



Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

PROYECTO FIN DE CARRERA

Modelado de la tela de araña y análisis de su comportamiento frente a impacto

Jaime Teus Fernández

Director: Ramón Zaera Polo

Titulación: Ingeniería Industrial

Fecha: Julio 2012

Índice

1	Introducción y objetivos.....	3
2	Antecedentes	7
2.1	Geometría de la tela de araña.....	8
2.2	Propiedades mecánicas de los hilos	12
2.2.1	En régimen cuasi-estático.....	12
2.2.2	En régimen dinámico	15
2.3	Respuesta de la tela ante un impacto de insecto	17
2.4	Función de la tela durante la captura de insectos	19
2.4.1	Importancia del rozamiento aerodinámico.....	19
2.4.2	Contacto insecto-tela	20
2.5	Coste energético asociado a la creación de la tela	21
2.6	Pretensión de los hilos	22
3	Modelo de la tela de araña	25
3.1	Tipo de elemento y sección.....	25
3.2	Tipos de material (VUMAT)	27
3.3	Modelización del insecto.....	30
3.4	Contacto insecto-tela de araña	31
3.4.1	Comportamiento tangencial del contacto	31
3.4.2	Comportamiento normal del contacto.....	33
3.5	Pretensión.....	36
3.6	Fuerzas aerodinámicas	37
4	Generador del modelo	39
4.1	Metodología para crear un modelo completo	39
4.1.1	Introducción de los parámetros	39
4.1.2	Ejecución del primer script “Geometria.py”	40
4.1.3	Asignación de secciones a las diferentes regiones.....	41
4.1.4	Ejecución del segundo script “Ensamblaje.py”	42
4.1.5	Creación del set “SETFUERZAS”	42
4.1.6	Ejecución del tercer script “Fuerzas.py”	43

4.1.7	Mallado del modelo y creación de la interacción y de los sets de las distintas regiones de la tela	43
4.2	Primer script:	45
4.2.1	Creación de los materiales	45
4.2.2	Creación de las secciones	47
4.2.3	Creación del marco.....	47
4.2.4	Creación de los hilos del marco secundario	48
4.2.5	Creación de los hilos de suspensión.....	50
4.2.6	Creación de los hilos radiales	51
4.2.7	Creación de los hilos de la espiral	53
4.3	Segundo Script.....	55
4.3.1	Ensamblaje de las distintas partes	55
4.3.2	Creación de los steps del modelo.....	56
4.3.3	Creación de la esfera	57
4.3.4	Creación de las propiedades del contacto	58
4.4	Tercer script.....	59
4.5	Análisis de sensibilidad.....	60
5	Análisis de resultados.....	63
5.1	Influencia de la fuerza aerodinámica	63
5.2	Influencia de las propiedades mecánicas de los hilos en régimen dinámico	66
5.3	Influencia de la pretensión en los hilos.....	70
5.4	Intercambio de propiedades entre los hilos espirales y radiales.....	73
5.4.1	Intercambio de propiedades mecánicas	75
5.4.2	Intercambio de diámetros	78
5.5	Influencia del marco secundario	80
5.6	Influencia del número de hilos radiales y espirales	83
5.7	Influencia del diámetro de los hilos	86
6	Conclusiones y trabajos futuros.....	91
6.1	Conclusiones.....	91
6.2	Trabajos futuros	92
7	Bibliografía	93

1 Introducción y objetivos

Desde hace muchos años ha existido un gran interés por parte de la comunidad científica en el estudio de las telas de araña. Estos estudios se dividen en dos grandes categorías: Las propiedades mecánicas de los hilos, en la cual se intenta comprender cuáles son los motivos micromecánicos por los que el hilo tiene propiedades notables, y la tela como estructura, en la que se intenta comprender su funcionamiento.

La seda de la araña es un material excepcional. Puede ser casi tan fuerte como el acero a la vez que 30 veces más dúctil (Gosline et al., 1986). Gracias a sus diferentes glándulas, las arañas son capaces de producir fibras de comportamiento mecánico muy distinto, y esta versatilidad permitirá su adaptación a distintas condiciones. La combinación de resistencia y ductilidad permite a los hilos absorber sin romperse una energía cinética mayor que la mayoría de materiales conocidos (Gosline et al., 1999). Dadas sus características mecánicas incomparables tanto con fibras naturales como sintéticas, existe un gran interés en su estudio ya que podrían servir como modelo para la producción comercial de polímeros estructurales de base proteica mediante ingeniería genética. Su campo de aplicación abarcaría a sectores muy variados, de los cuales solamente se mencionarán algunos:

- Tendones y ligamentos artificiales (Sector médico)
- Paracaídas y chalecos antibala (Sector militar)
- Redes de pesca (Sector piscícola)
- Refuerzo de materiales (Sector de la automoción y construcción)

Muestra de este interés actual puede reflejarse en la portada del día 2 de febrero de este mismo año (2012) de la prestigiosa revista "Nature", que titula: "Hidden Strength: Nonlinear failure of spider silk is secret of its success" (Cranford et al.).

Hay muchos estudios acerca de la seda como fibra polimérica de alto rendimiento en términos de la elasticidad entrópica (Gosline et al., 1986), del recubrimiento de agua (Vollrath & Edmonds, 1989), de la resistencia a la rotura (Osaki, 1996), de la expresión de la familia genética (Guerette et al., 1996) y de las características microestructurales entre otros. Sin embargo se sabe muy poco sobre las propiedades de la estructura de la tela de araña a pesar de existir algunos estudios sobre la vibración (Masters, 1984; Lin et al., 1995), la pretensión inicial (Wirth & Barth, 1992) y algunas modelizaciones con la técnica de los elementos finitos (Lin et al., 1995, Alam et al., 2007; Aoyanagi & Okumura, 2010).

Las telas de araña parecen estructuras simples cuando se comparan con otros tipos de tela. Se puede describir su geometría de manera muy precisa con una simple fotografía, pero este tipo de análisis superficial no revela nada acerca de las tensiones presentes o las normas genéticas que rigen su construcción (Vollrath et al., 1997).

La tela es una estructura creada a partir de un patrón de movimientos muy específico. Tiene dos funciones principales: sostener a la araña y atrapar insectos. Puede ser unidimensional, bidimensional o tridimensional, como también pegajosa o no; construida a base de líneas simples de hilo o de auténticas marañas del mismo. Esto demuestra su complejidad y variabilidad, aunque todas tienen en común la creación y conexión de los distintos tipos de hilo en varias etapas indiscernibles (Vollrath, 1992).

Aunque la tela de araña sea muy ligera, es una estructura altamente optimizada, presumiblemente como resultado de la evolución desde el período Jurásico (Selden, 1989). Esta evolución ha hecho que la tela de araña actual sea capaz de resistir de manera eficiente diferentes cargas como el viento y el impacto de un insecto, pudiendo funcionar incluso cuando varios elementos se han roto (Alam & Jenkins, 2005). Tiene una variedad impresionante de diseños, algunos efectivos a la hora de capturar insectos como mosquitos, y otros pudiendo llegar a detener pequeños pájaros.

Este proyecto se centra en los aspectos menos estudiados hasta la fecha, los relacionados con la respuesta estructural de la tela, e intenta esclarecer la función que desempeñan los diferentes tipos de hilo, la topología estructural y las propiedades mecánicas de la seda de araña en su respuesta frente a cargas impulsivas, intentando esclarecer la funcionalidad y comportamiento de algunos aspectos de la estructura de la tela de araña.

El objetivo que se plantea en este proyecto es analizar el efecto que cada uno de los siguientes factores tiene en la respuesta estructural dinámica de la tela de araña:

- El rozamiento aerodinámico
- La pretensión de los hilos
- El comportamiento viscoelástico y viscoplástico de los hilos
- La topología estructural de la tela
 - El marco secundario
 - La cantidad de hilos
 - El diámetro de los hilos
 - La proporción de hilos radiales y espirales

La metodología que se ha seleccionado está basada en la modelización numérica mediante un código de elementos finitos. Por ello, para la consecución de estos objetivos generales, ha sido necesario también plantear los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollo de un generador de malla
- Desarrollo de subrutinas de usuario para definir tanto el material como el rozamiento aerodinámico

2 Antecedentes

Existen diferentes tipos de tela de araña en la naturaleza, cada una de ellas con un propósito bien definido. Las principales se describen a continuación:

- “Sheet web”: Suelen encontrarse en medios naturales, como por ejemplo entre las ramas de un árbol. La araña espera boca abajo a su presa, y en el momento que impacta tira de ella con el fin de paralizarla (figura 2.1).
- “Funnel web”: Es plana y horizontal con un agujero en forma de túnel donde se encuentra la araña. Desde ese punto siente las vibraciones creadas por los insectos que se encuentran en sus hilos (figura 2.2).
- “Orb web”: Es una tela con una geometría bien definida, en la que quedan adheridos insectos voladores (figura 2.3).
- “Cobweb”: A la vista parece que este tipo de tela es un desorden, pero son eficientes a la hora de capturar insectos. Cuando una presa queda adherida, la araña la rodea con hilos para paralizarla (figura 2.4)



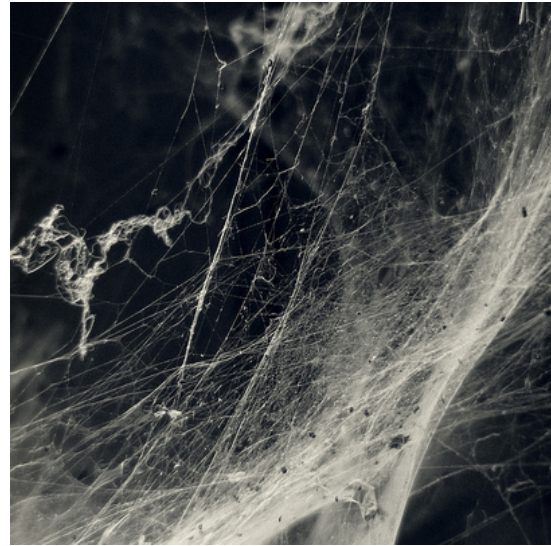
Fig. 2.1 Tela de araña tipo "sheet"



Fig. 2.2 Tela de araña tipo "funnel"



Fig. 2.3 Tela de araña tipo "orb"



2.4 Tela de araña tipo "cobweb"

La "Orb web" es un caso especial de tela de araña y es la más interesante desde el punto de vista estructural, por lo que este proyecto se centrará en esta topología.

2.1 Geometría de la tela de araña

La tela de araña es una estructura creada a partir de un patrón de movimientos muy específico. Tiene dos funciones principales: Sostener a la araña y atrapar insectos. Puede ser unidimensional, bidimensional o tridimensional, como también pegajosa o no; construida a base de líneas simples de hilo o de auténticas marañas del mismo. Esto demuestra su complejidad y su variabilidad, aunque todas tienen en común varias etapas indiscernibles como son la creación de los hilos radiales y del marco, los de la espiral y los del centro (Vollrath, 1992).

Debido a que hay un largo historial de investigación acerca de las telas de araña, ha surgido una terminología muy variada e incluso a veces contradictoria para describir estas estructuras (Blackledge et al., 2011). Zschokke en 1999 resume todo lo mencionado acerca de la nomenclatura. A continuación se presentan los términos principales descritos en su artículo, y la denominación que se adoptará en este proyecto:

- *"Anchor threads" y "frame threads"*: Hilos de suspensión e hilos del marco. La tela está anclada por los hilos de suspensión a la estructura de soporte por medio de los puntos de anclaje (*"Anchor points"*). El hilo que se encuentra a lo largo del exterior de la tela se llama hilo del marco (primario), y está unido por sus dos extremos a los hilos de suspensión. Existe también un marco secundario unido a dos puntos del marco primario, formando una esquina.

- “*Radii*”: Hilos radiales. Son los hilos que van de manera más o menos recta del centro de la tela al marco primario. Varios autores distinguen entre distintos tipos de hilos radiales.
- “*Spirals*”: Hilos de la espiral. Los hilos espirales son la característica distintiva de las telas de araña. Existen dos tipos: La espiral hecha a partir de seda pegajosa, la “espiral pegajosa”, y la hecha a partir de seda no pegajosa, la “espiral auxiliar”. Ésta última suele ser eliminada por las arañas una vez terminada la construcción de la tela.

En la figura 2.5 se presenta un esquema explicativo, muy útil para familiarizarse con la terminología (aunque la mayoría de los nombres no se usarán en todo el proyecto).

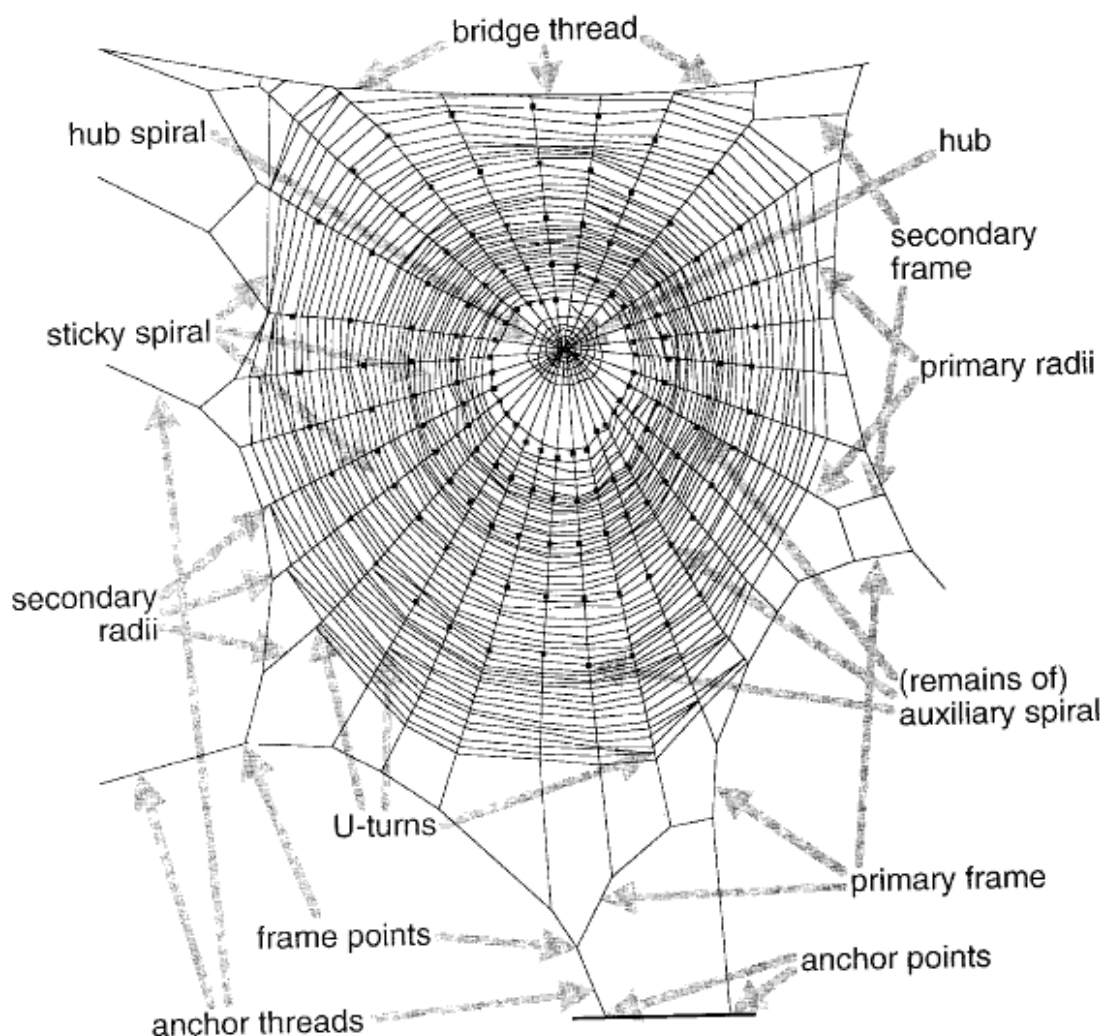


Fig. 2.5 Esquema explicativo de la terminología usada para definir la tela de araña (Zschokke, 1999)

A partir de la publicación del artículo de Zschokke en 1999, la mayoría de los autores utilizan la terminología anteriormente definida como se puede ver en la figura 2.6 extraída de un artículo publicado recientemente.

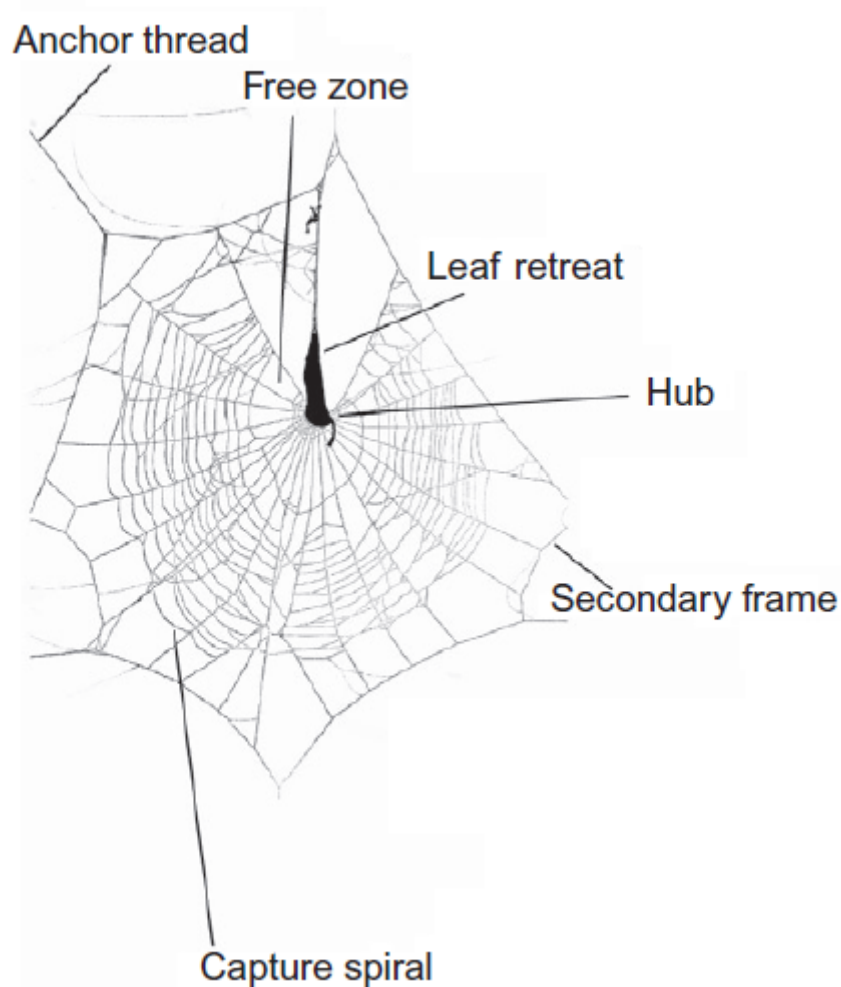


Fig. 2.6 Descripción de una tela de araña (Blackledge et al., 2011)

Después de haber creado la tela, las arañas añaden hilos al centro para ajustar la pretensión del conjunto. Algunas renuevan dicho hilo de vez en cuando, y otras simplemente lo quitan. En este último caso, la región central de la tela es una zona en la que solo hay hilos radiales, pudiendo la araña desplazarse con rapidez de un lado a otro. Tras esa región se encuentra la zona de captura, limitada por los hilos internos y externos de la espiral (Blackledge et al., 2011).

Después de analizar la información previamente expuesta, la terminología que se utilizará en este proyecto es la presentada en la figura 2.7.

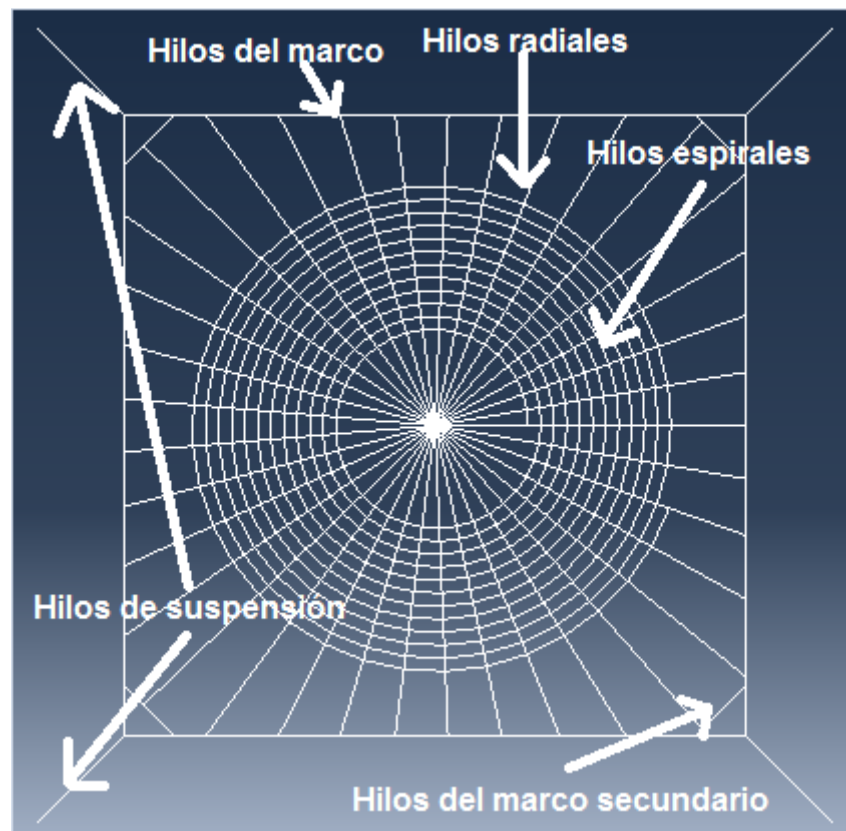


Fig. 2.7 Terminología adoptada en este proyecto para definir los diferentes hilos de la tela de araña

Para crear diferentes modelos de tela de araña habrá que saber en qué rango de valores se encuentran algunos parámetros necesarios para la definición de la misma, como puede ser el número de hilos radiales, el paso de la espiral o las dimensiones de la estructura. Vollrath (1977) crea una tabla a partir de medidas experimentales efectuadas en un alto número de telas de araña de la especie *Araneus Diadematus*, y los parámetros relevantes de la misma se presentan en la tabla 2.1.

	Normal	Small	Horizontal	Vertical
Frame area	900 cm ²	225 cm ²	300 cm ²	300 cm ²
No. of spiders	106	16	11	9
No. of webs	310	27	21	18
Radii number	33.4 ± 0.29	33.1 ± 1.11	24.8 ± 0.94*	27.9 ± 0.92*
Radial length	3383 ± 48	2240 ± 84*	1605 ± 121*	1860 ± 61*
Spiral length	9487 ± 211	7471 ± 390	4847 ± 400*	5934 ± 292*
Mesh number:				
top	26.5 ± 0.44	27.3 ± 1.14	16.3 ± 1.33*	23.8 ± 1.09
bottom	33.3 ± 0.47	34.4 ± 1.36	18.9 ± 1.23*	30.7 ± 1.22
right	28.1 ± 0.48	29.1 ± 1.15	21.5 ± 1.44*	19.4 ± 1.04*
Mesh spacing:				
top	2.46 ± 0.041	1.51 ± 0.040*	2.01 ± 0.104	2.26 ± 0.097
Bottom	2.40 ± 0.037	1.66 ± 0.075*	1.89 ± 0.095	2.05 ± 0.081
right	2.24 ± 0.040	1.49 ± 0.057*	2.11 ± 0.140	1.45 ± 0.071*

Tabla 2.1 Parámetros geométricos de la tela de araña de una Araneus Diadematus (Vollrath et al., 1997). Las medidas de longitud están expresadas en mm.

2.2 Propiedades mecánicas de los hilos

Las propiedades mecánicas de los hilos de la tela de araña han sido estudiadas durante más de 40 años (Zemlin, 1968). Se ha podido concluir que los hilos no son solamente muy resistentes (tienen una tensión de rotura muy elevada) y muy dúctiles (tienen una energía de rotura por unidad de volumen muy elevada), sino que las arañas también pueden producir fibras con comportamiento mecánico muy distinto gracias a sus diferentes glándulas (Denny, 1976; Swanson et al., 2009). Por lo tanto las telas son una combinación de hilos resistentes y rígidos, y otros altamente elásticos (Sensenig et al., 2012).

2.2.1 En régimen cuasi-estático

El módulo de Young mide la rigidez inicial del material, y los hilos con mayor módulo resistirán mejor la deformación a una tensión dada. El límite de fluencia es el punto de transición del material entre el comportamiento elástico y el elastoplástico. A partir de ahí, el hilo se deforma irreversiblemente y sus propiedades mecánicas se ven alteradas permanentemente (Boutry & Blackledge, 2009). En esta segunda rama, el hilo sufre un endurecimiento creciente debido al alineamiento de las moléculas dentro del hilo (Planas et al., 2007). Si la tensión alcanza el valor de ruptura, el hilo rompe.

En la bibliografía propuesta pueden encontrarse mucha información relacionada con las propiedades de los materiales de los hilos de la tela de araña. Principalmente se puede encontrar:

- Gráficas de las curvas tensión – deformación
- Módulo de Young
- Tensión de rotura
- Deformación de rotura

Se ha realizado una búsqueda exhaustiva en la bibliografía para obtener toda la información que podría ser interesante, resumida en la siguiente tabla 2.2.

Durante la búsqueda de las propiedades mecánicas de los hilos de la tela de araña, también se han encontrado datos relativos a la densidad. Debido a que los hilos tienen un diámetro y una masa extremadamente pequeños el cálculo de la misma es muy complicado y por eso casi ningún artículo la menciona ni la tiene en cuenta. Ko & Jovicic (2004) utilizan para sus comparaciones entre distintos materiales una densidad de 1098 kg/m^3 para los hilos de la tela, que es el valor que se utilizará en este proyecto.

Autor	Año	Región de los hilos	Especie de araña	Tensión de rotura (GPa)	Deformación de Rotura	Módulo de Young (GPa)
Blackledge et al.	2005b	Marco	Latrodectus Hesperus	1.5	0.35	11
		Radial & Espiral	Latrodectus Hesperus	1.45	0.39	9
Gosline et al.	1999	Marco & Radial	Araneus Diadematus	1.1	0.27	10
		Espiral	Araneus Diadematus	0.5	2.7	0.003
Lin & Sobek	1998	Espiral		0.8		0.5
		Radial		1.2		2.6
		Marco		1.25		5.555
		Suspensión		1.3		7
Moore & Tran	1999	Media	Latrodectus Hesperus	1.1	0.22	6
		Marco	Nephila Maculata	1.1	0.46	
		Marco	Araneus Serratus	0.81	0.24	
		Radial	Araneus Diadematus	1.2	0.4	
		Espiral	Araneus Serratus	1	2	
		Espiral	Araneus Diadematus	1.4	4.76	
Blackledge et al.	2005a	Espiral	Latrodectus Hesperus	0.6	5	
		Marco	Latrodectus Hesperus	1.9	0.3	
Boutry & Blackledge	2009	Marco	Achaearanea tepidariorum	1.638	0.35	11.4
		Radial & Espiral	Achaearanea tepidariorum	1.569	0.44	9.9
		Radial & Espiral	Latrodectus Hesperus	1.316	0.39	8.9
		Radial & Espiral	Latrodectus Hesperus	0.957	0.47	9.2
		Marco	Latrodectus Hesperus	1.069	0.42	10.7
		Marco	Latrodectus Hesperus	1.1	0.22	6
Cunniff et al.	1994	Media	Nephila Clavipes	1.1	0.09	22
		Media	Nephila Clavipes (Controlled)		0.181	12.7
		Media	Nephila Clavipes (Natural)		0.167	10.9
		Media	Argiope Aurantia (Controlled)		0.2	9.7
		Media	Argiope Aurantia (Natural)		0.206	9.9
		Media	Nephila Cruentata		0.199	3.6
		Media	Parawixla Audax		0.212	3.1
		Media	Argiope Argentata		0.172	4
		Marco	Araneus Diadematus		0.31	2.8
		Espiral	Araneus Diadematus		5.17	
Elices et al.	2010	Media	Argiope Trifasciata	0.78	0.26	
Rigueiro et al.	2003	Media	Argiope Lobata	0.77	0.22	7
		Media	Argiope Trifasciata	0.6	0.2	7

Tabla 2.2. Tabla resumen de las propiedades mecánicas encontradas en la bibliografía

2.2.2 En régimen dinámico

Denny (1976) estudia cómo afecta la velocidad de deformación al punto de rotura de los hilos de una tela de araña. No encuentra una correlación significativa con la deformación de rotura pero sí con la tensión de rotura, de manera que cuanto más rápido hace el ensayo, más alta es dicha tensión. Sus resultados se muestran en la figura 2.8.

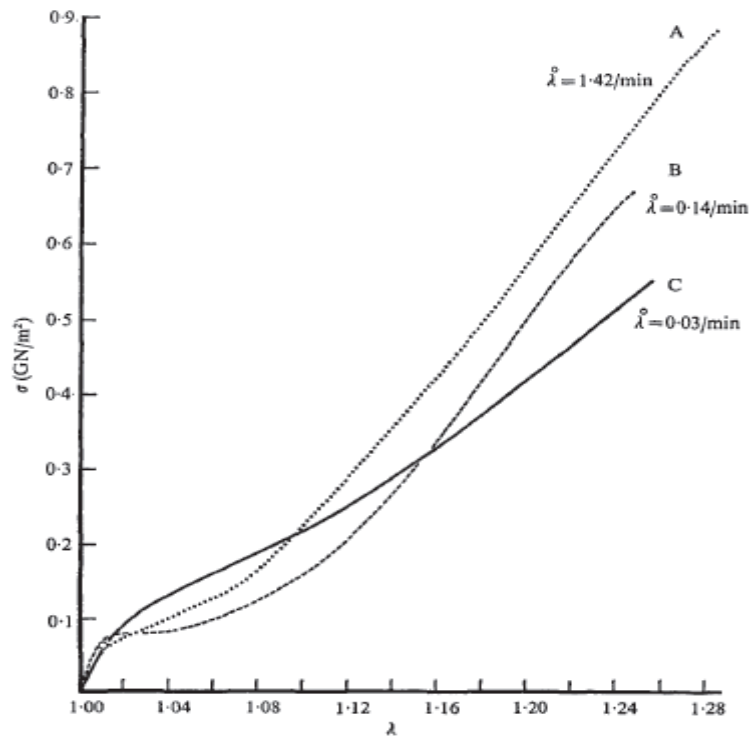


Fig. 2.8 Curvas tensión - deformación en función de la velocidad de deformación (Denny, 1976)

También encuentra una correlación directa con la pendiente del endurecimiento plástico en el tramo final de la curva, como demuestran los datos de la tabla 2.3.

Velocidad de deformación	0.03 / min	0.14 / min	0.03 / min
Pendiente del endurecimiento plástico en el tramo final	2.14 GPa	2.70 GPa	3.10 GPa

Tabla 2.3 Relación entre la velocidad de deformación y el endurecimiento plástico en el tramo final de la curva tensión – deformación.

Sin embargo, no identifica ninguna relación clara cuando la deformación es menor que 1,10 debido a la variabilidad de las medidas en la meseta de las curvas y también a las bajas fuerzas que aparecen para bajas deformaciones.

Gosline en 1999 supone que el carácter viscoelástico de los hilos de las telas de araña tiene un efecto beneficioso. Se basa en el estudio realizado por Denny en 1976, pero considera que las velocidades de deformación estudiadas son demasiado bajas como para poder compararlas a las causadas por el impacto de un insecto, por lo que realiza ensayos a una mayor velocidad (Figura 2.9).

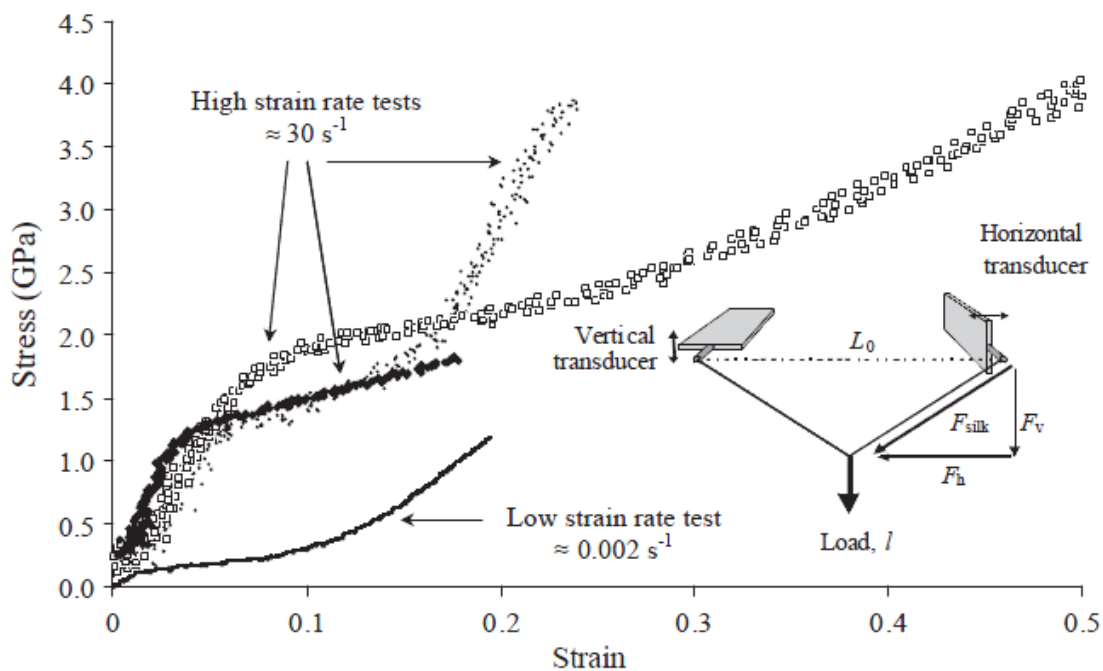


Fig. 2.9 Ensayos a altas velocidades de deformación (Gosline, 1999)

Los resultados que obtiene de su estudio junto a los que recoge de otros autores (Denny, 1976 y Cunniff et al, 1994) se muestran en la tabla 2.4.

Properties	Araneus				Nephila clavipes	
	Strain rate				0.1 s ⁻¹	≈3000 s ⁻¹
Initial stiffness, E_{init} (GPa)	9.8	8.9	20.5	25–40	22	20
Strength, σ_{max} (GPa)	0.65	0.72	1.12	2.0–4.0	1.3	
Extension to failure, ϵ_{max} (%)	24	24	27	20–50	12	10
Energy to failure (toughness) (MJ m ⁻³)	91	106	158	500–1000	80	

Tabla 2.4 Resultados de varios estudios sobre la influencia de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas (Gosline, 1999)

De esta manera confirma que hay una fuerte dependencia entre la velocidad de deformación y las propiedades del material. Sin embargo, no se ha encontrado ningún artículo que describa mediante una ecuación el comportamiento de los hilos de la tela de araña considerando la velocidad de deformación.

2.3 Respuesta de la tela ante un impacto de insecto

En 2004, Ko & Jovicic analizan la influencia de las propiedades de los materiales y de la arquitectura de la tela en la integridad estructural y rendimiento mecánico, mediante los resultados experimentales obtenidos con un software de elementos finitos.

Simulan el impacto de un insecto de masa 0,5 gramos y velocidad inicial 1 m/s contra una tela con una pretensión de 5 N. El material del que están compuestos los hilos va variando, adoptando los valores que proponen en la tabla 2.5.

material	density [kg/m ³]	tensile modulus E_L (GPa)	Poisson's ratio ν	strength σ (GPa)	strain %
spider silk	1098	0.003	0.49	0.58	150
viscid dragline		34		1.75	26
Kevlar 29	1450	45	0.34	2.8	3.6
spectra	970	101	0.4	3.0	3.4
PBO	1540	270	0.35	5.8	3.5

Tabla 2.5 Propiedades mecánicas de los materiales comparados (Ko & Jovicic, 2004)

Obtiene medidas de la energía debida a la deformación elástica y plástica para distintos materiales, representadas en las figuras 2.10 y 2.11 respectivamente.

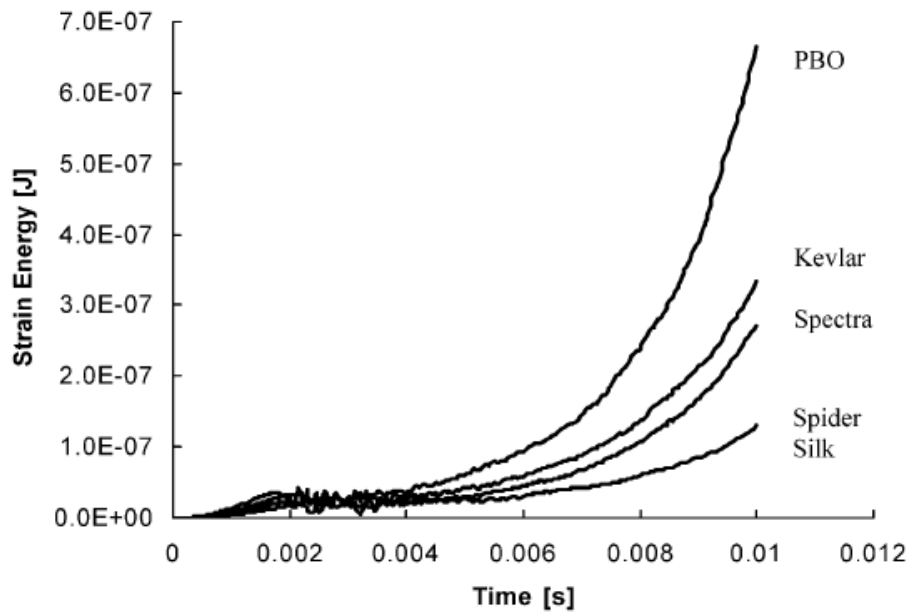


Fig. 2.10 Energía de deformación elástica en la tela de araña en función del tiempo para hilos de distintos materiales (Jo & Jovicic, 2004)

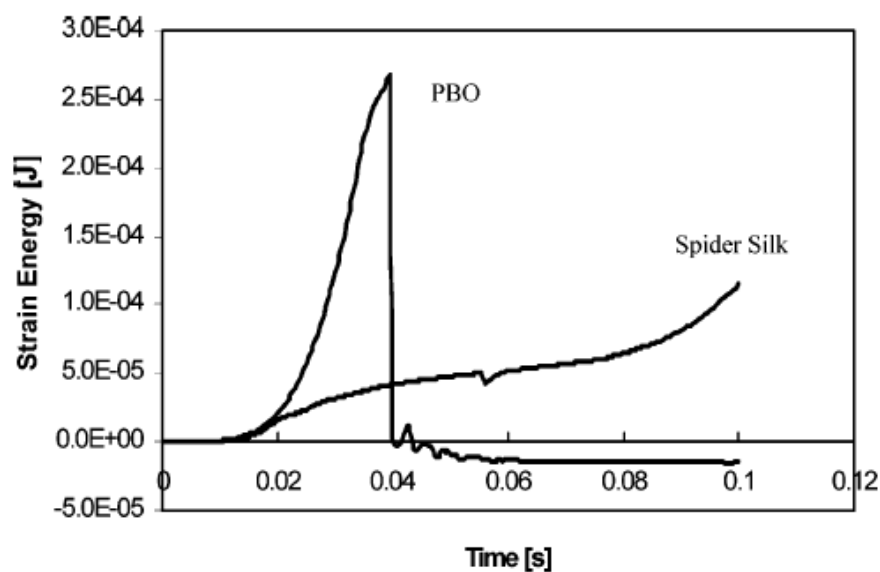


Fig. 2.11 Energía de deformación plástica en la tela de araña en función del tiempo para hilos de distintos materiales (Jo & Jovicic, 2004)

La energía de deformación tanto elástica como plástica es menor utilizando como material los hilos producidos por la araña que el resto de materiales estudiados. En el instante 0,04s de la figura 2.11, la energía de deformación plástica del material PBO disminuye drásticamente debido a que los hilos han llegado al punto de ruptura.

La excelente combinación de resistencia y tenacidad de los hilos producidos por una araña ofrecen un gran potencial y unas características dinámicas superiores a las de otros materiales con mayor resistencia a la tracción (Jo & Jovicic, 2004).

2.4 Función de la tela durante la captura de insectos

Las telas de araña interactúan principalmente con insectos que no pueden ser capturados a menos que puedan disipar satisfactoriamente su energía cinética sin romperse. Las propiedades mecánicas de los hilos se pueden medir fácilmente en el laboratorio, pero sus interconexiones en las telas son muy complejas (Blackledge et al., 2011).

La energía cinética de los insectos puede ser disipada a través de al menos cuatro vías en las telas:

- Deformación interna de los hilos espirales
- Deformación interna de los hilos radiales
- Rotura de las uniones de los hilos
- Amortiguación aerodinámica debido al movimiento de la tela

2.4.1 Importancia del rozamiento aerodinámico

Los hilos de las telas de araña tienen un número de Reynolds intermedio, que caracteriza la importancia relativa de las fuerzas inerciales frente a las viscosas cuando interactúan con fluidos tales como el aire (Lin et al., 1995). Pero la importancia de la disipación de la energía cinética de un insecto por efecto aerodinámico sobre las telas de araña no está clara. Algunos estudios sugieren que es crucial para detener a insectos, y otros ignoran completamente su efecto a la hora de describir la mecánica de la tela (Sensenig et al., 2012).

En el artículo anteriormente mencionado, se indica que la disipación de energía en las telas puede ser particionado en tres componentes: Disipación interna en los hilos radiales, en los espirales y la debida al efecto aerodinámico cuando la tela oscila durante el impacto de un insecto. Se hacen varias simulaciones para comparar el aporte de cada componente, cuyos resultados se exponen en la figura 2.12.

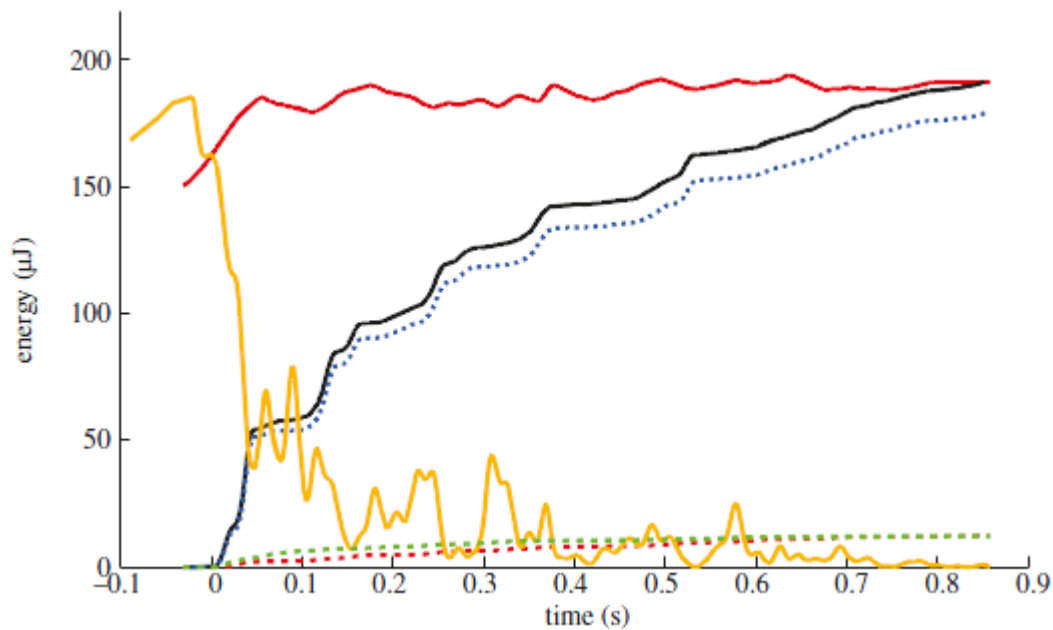


Fig. 2.12 Balance de energía en la tela de araña durante el impacto de un insecto. Línea roja, energía total; línea amarilla, energía cinética del insecto; línea negra, energía total absorbida; línea discontinua azul, energía interna radial; línea discontinua roja, energía interna espiral; línea discontinua verde, aerodinámica. (Sensenig et al., 2012).

En el estudio se calcula el trabajo realizado internamente por los hilos radiales y espirales como también el obrado por la resistencia aerodinámica, y concluyen que estas dos últimas componentes no tiene una importancia significativa.

Esto marca una diferencia con los estudios anteriores (independientemente de la conclusión a la que llegan), ya que estos hablaban sobre la importancia de la resistencia aerodinámica pero sin cuantificarla experimentalmente.

2.4.2 Contacto insecto-tela

Muchos insectos escapan de las telas antes de ser atacados por las arañas (Nentwig, 1982). Esto hace que la capacidad de adhesión y la rápida respuesta por parte de la araña sea crucial.

En la zona de captura de la tela existen unas pequeñas gotas distribuidas regularmente que son las principales causantes de la adhesión (Figura 2.13). Dichas gotas están compuestas por gránulos de glicoproteínas de un tamaño aproximado de 20 μm y un revestimiento de sales. Cuando un insecto impacta sobre los gránulos, éstos se deforman y se estiran. Cuánto más rápida sea esa deformación, más viscosos se vuelven. De esta manera la presa queda adherida a la tela de araña (Sahni et Al, 2010).

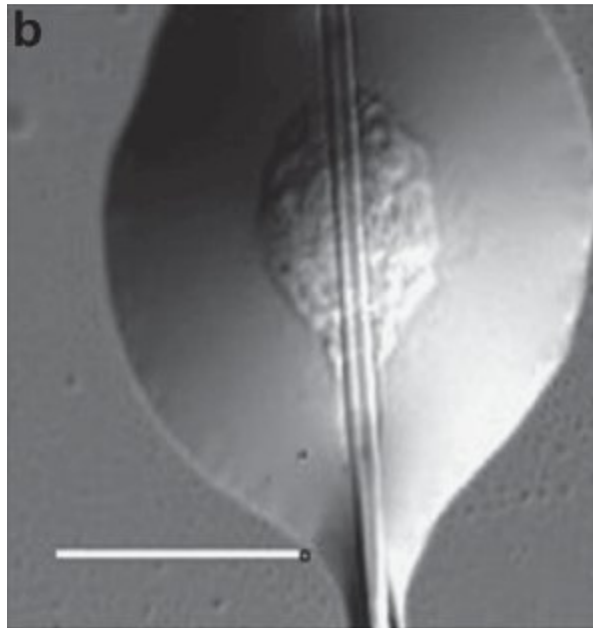


Fig. 2.13 Fotografía de los gránulos viscosos (Sahni et al., 2010)

En este proyecto no se van a modelizar los gránulos, pero sí se va a considerar su efecto adherente durante el impacto de un insecto.

2.5 Coste energético asociado a la creación de la tela

Hilar telas constituye la mayor parte del gasto energético diario de una araña (Tanaka, 1989). Debido a que los hilos están mayoritariamente compuestos por proteínas, la energía calórica es más o menos constante para todas las arañas y por lo tanto el coste será proporcional a la cantidad total de hilo presente en una tela (Lubin, 1973).

Prestwich en 1977 pasa de la hipótesis al cálculo, partiendo de la idea propuesta por Lubin en 1973 y de lo mencionado por varios autores (Anderson, 1970; Peakall & Witt, 1976) sugiriendo que el coste total de la construcción de una tela es debido a dos vertientes: la actividad de la araña durante el tejido y el valor calórico de los hilos. Obtiene el consumo neto de oxígeno por miligramo de masa de araña en función del peso total de los hilos para distintos tipos de tela, cuyos resultados se exponen en la figura 2.14.

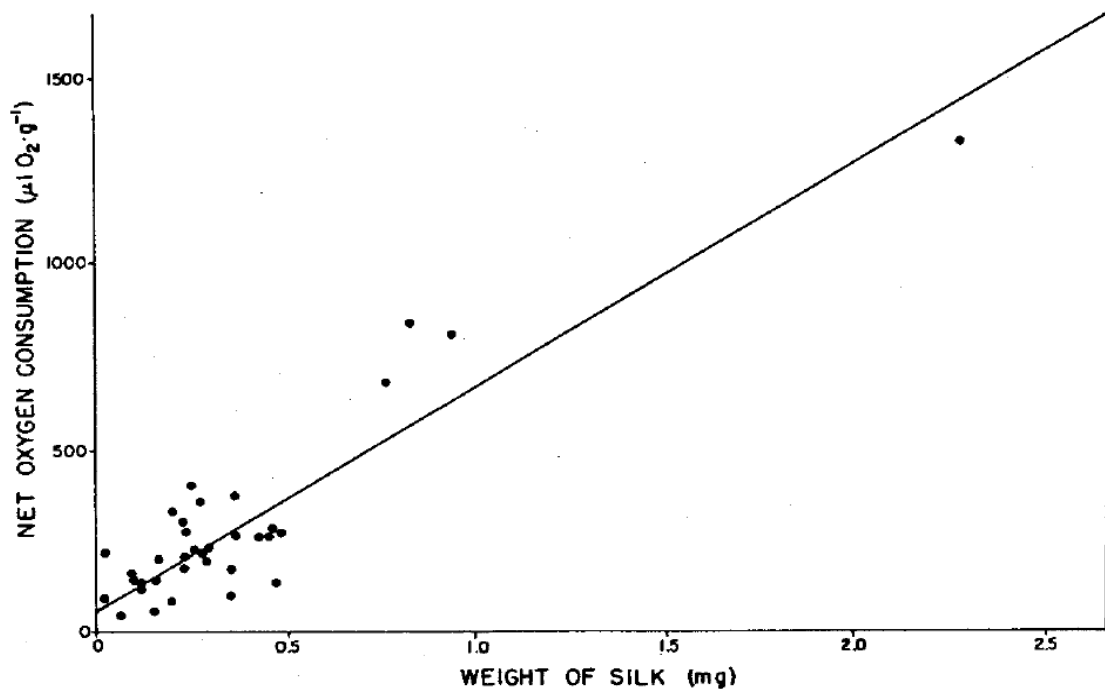


Fig. 2.14 Consumo neto de oxígeno por g de araña y por mg de hilo (Prestwich, 1977)

A partir de la gráfica anterior hace una estimación del coste energético debido a la actividad de la araña (ecuación [1]). La otra componente, correspondiente al valor calórico de la tela, la obtiene estudiando artículos de otros autores (ecuación [2]).

$$\text{Coste energético asociado a la actividad} = 9 \text{ cal} / (\text{mg de tela}) \times (\text{g de araña}) \quad [1]$$

$$\text{Valor calórico de la tela} = 4,57 / (\text{mg de tela}) \quad [2]$$

Con estos resultados confirma que para una masa de araña dada, el coste energético asociado a la creación de la tela es proporcional a la masa total de hilo que la compone.

2.6 Pretensión de los hilos

Los hilos de las telas de araña tienen cierta pretensión para estabilizar el conjunto. Dichas fuerzas disminuyen desde los hilos de suspensión, pasando por los hilos del marco y terminando con los hilos radiales con un ratio 10:7:1 (Wirth & Barth, 1992). En la tabla 2.6 están los valores de las fuerzas y de sus tensiones correspondientes.

		Área del hilo	Fuerza (μN)	Tensión (MPa)
Región	Radial	9.6212E-12	132	13.7
	Marco	1.96E-11	924	47.1
	Suspensión	1.96E-11	1320	67.2

Tabla 2.6 Fuerza y tensión inicial presentes en los hilos de una tela de araña (Lin & Sobek, 1998)

3 Modelo de la tela de araña

Se ha elegido la versión explícita de ABAQUS para realizar las simulaciones de impacto por su mayor eficiencia en la resolución de problemas dinámicos no lineales. El lenguaje de programación utilizado es “Python”, debido está totalmente incorporado en ABAQUS.

3.1 Tipo de elemento y sección

Van a ser utilizados elementos del tipo T3D2 (tipo “Truss”, 3 dimensiones, 2 nodos por elemento), ya que sus propiedades son las más convenientes para modelizar los hilos de la tela de araña:

- Sólo transmiten fuerzas en la dirección axial
- No transmiten momentos

Al utilizar elementos de tipo T3D2, hay que definir los siguientes parámetros:

- El área transversal del hilo
- El material que va a ser utilizado para dicho hilo

Suponiendo que los hilos de las telas de araña tienen una sección perfectamente circular, conociendo únicamente su diámetro se podrá definir el área. Analizando varios artículos relacionados con el tema se han podido obtener los datos mostrados en la tabla 3.1.

Si se analizan los datos en cuestión, se puede ver que el diámetro del hilo depende de la región en la que se encuentre. Los hilos con mayor diámetro son los de la región de suspensión, luego los del marco, después los radiales, y finalmente los espirales.

			Diámetro del hilo (μm)			
Autor principal	Año de publicación	Especie de araña	Espiral	Radial	Marco	Suspensión
Blackledge et al.	2005	Latrodectus Hesperus	2,3		2,6	
Lin & Sobek	1998	Araneus Diadematus	2,4	3,93	7,23	8,03
Moore & Tran	1999	Latrodectus Hesperus	4			
Blackledge & Zevenbergen	2007	Latrodectus Hesperus	2,8			
Boutry & Blackledge	2009	Achaearanea tepidariorum	1,6		1,85	
Ko & Jovicic	2004	Nephila Calvipes	4,2			

Tabla 3.1 Diámetro de los hilos de la tela de araña encontrados en la bibliografía

Al conjunto de hilos de cada región de la tela de araña le va a ser asignado un material en particular, ya que como se verá en el siguiente apartado donde serán definidos, sus propiedades difieren bastante. Los diámetros que definirán el área de la sección de los hilos y los nombres de los materiales que van a ser utilizados en las simulaciones son los expuestos en la tabla 3.2.

	Región		
	Espiral	Radial	Marco y Suspensión
Diámetro (m)	2,30E-06	3,50E-06	5,00E-06
Área (m^2)	4,15E-12	9,62E-12	1,96E-11
Nombre del material	SILK1	SILK2	SILK3

Tabla 3.2 Diámetro y nombre del material asignado a cada tipo de hilo

3.2 Tipos de material (VUMAT)

Uno de los pasos más importantes es encontrar la manera de modelizar los materiales que definan el comportamiento de los hilos de la tela de araña de la manera más fidedigna posible.

ABAQUS ofrece muchas posibilidades para definir un material. En este proyecto se usará una subrutina tipo VUMAT (subrutina de definición de un material de usuario) desarrollada por el profesor Zaera que permitirá:

- Modelizar el comportamiento elástico-lineal del material
- Conseguir una deformación permanente en los elementos a partir de un cierto valor de tensión
- Considerar rotura de los hilos una vez alcanzada la deformación de rotura

Para simplificar el modelo, se ha representado el incremento continuo del endurecimiento en la rama elastoplástica mediante dos rectas, como puede verse en la figura 3.1.

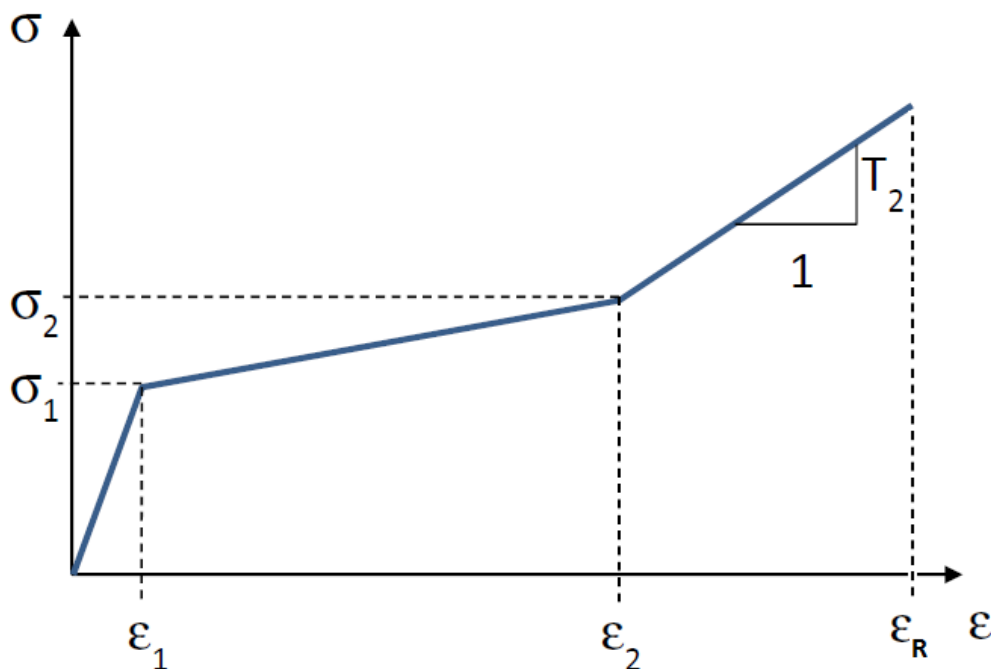


Fig. 3.1 Curva tensión - deformación con las variables usadas por la subrutina

Los parámetros utilizados en la figura 3.1 son:

- σ_1 : Límite elástico
- ϵ_1 : Deformación correspondiente al límite elástico
- σ_2 : Tensión que determina el final del primer tramo en la región plástica
- ϵ_2 : Deformación correspondiente a σ_2
- T_2 : Pendiente de la recta del último tramo del material
- ϵ_R : Deformación de rotura

Tras analizar los datos recogidos de la bibliografía, los puntos característicos que van a ser utilizados para definir los materiales de los hilos de las distintas regiones de la tela de araña son los siguientes:

Región	Espiral	Radial	Soporte
σ_1 (MPa)	30	275	275
ϵ_1	0,025	0,025	0,025
σ_2 (MPa)	40	300	300
ϵ_2	1,5	0,12	0,12
T_2 (MPa)	560	5000	5555
ϵ_R	2,5	0,3	0,3

Tabla 3.3 Tabla con los puntos característicos de la curva tensión – deformación para la definición de los materiales

Las curvas de tensión–deformación correspondientes al comportamiento mecánico de los tres materiales son presentadas en la figura 3.2.

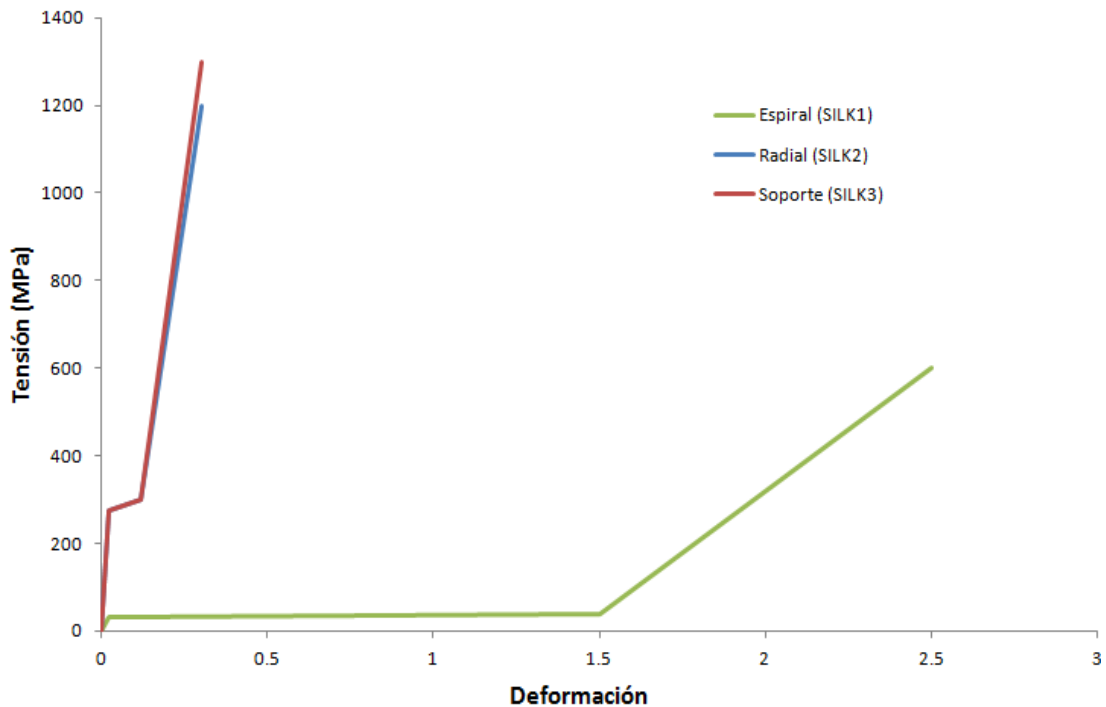


Fig. 3.2 Curvas tensión - deformación de los materiales

Como ya se ha visto anteriormente, hay ciertas propiedades de los hilos que varían en función de la velocidad de deformación, y en este modelo son las siguientes:

- El módulo de Young
- La deformación de rotura
- El nivel de flujo plástico

Se ha considerado que estas variables aumentan linealmente con el logaritmo de la velocidad de deformación. Es un tipo de ajuste muy aceptado tanto para materiales metálicos como poliméricos, aunque como no se han podido encontrar estudios que profundicen mucho en este aspecto hay que utilizar estos datos con mucha prudencia.

Aunque no sea totalmente riguroso, es interesante ver las consecuencias que produce este efecto durante el impacto de un insecto. Basándose en los resultados propuestos por Gosline en 1999, se determinaron las cuatro últimas variables necesarias para la definición del comportamiento de los materiales: La primera determina la velocidad de deformación para la cual los parámetros introducidos para definir un material son los adecuados ($\dot{\epsilon}_0$ en [3]), y las otras tres multiplican para cada parámetro al logaritmo de las velocidades de deformación (sensibilidadE en [3]). Se puede ver un ejemplo para el módulo de Young en la ecuación [3], siendo de manera análoga para los otros dos parámetros.

$$E_c = E_0 \times \left(1 + \text{sensibilidadE} \times \log_{10} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) \quad [3]$$

3.3 Modelización del insecto

Para modelizar el insecto es necesario conocer de antemano algunas propiedades de una presa tipo. En la tabla 3.4 se resume la información que se ha podido recopilar.

Autor	Año de publicación	Insecto	Masa (g)	Longitud del cuerpo (mm)	Longitud de las alas (mm)	Velocidad máxima (m/s)
Prokop	2006	Damselfly	0,034	33,6	-	-
		Honey Bee	0,078	14,89	-	-
Denny	1976	Mosquito	0,00189	-	3,5	3,6
		Fruit fly	0,006	-	4	1,7
		House fly	0,012	-	5,5	1,9
		Honey Bee	0,097	-	9	2,33
		Bumble Bee	0,388	-	16	1,3
		Dragonfly	0,958	-	48	0,35
Blackledge & Zevenbergen	2007	Hangingflies	0,0201	14,3	16,4	0,97
		Deer flies	0,0153	9,0	7,6	1,72
		Small grasshoppers	0,164	17,4	-	2,49
		Large grasshoppers	0,355	24,4	-	2,43

Tabla 3.4 Características de distintos tipos de insecto

La presa tipo de referencia va a ser modelizada por una esfera analítica rígida de 20 mm. La masa y la velocidad van a ir variando en las distintas simulaciones, pero siempre con valores acordes con los presentes en esta tabla.

3.4 Contacto insecto-tela de araña

Habrá que definir en ABAQUS el tipo de interacción entre los dos cuerpos presentes durante el impacto, que son la esfera que representa al insecto y los hilos de la tela de ar a. Para definir completamente el contacto, hay que estudiar los comportamientos tangencial y normal que mejor lo representan. Como en la bibliografía no hay estudios sobre estos efectos, se han realizado varias simulaciones y se ha elegido la más realista.

3.4.1 Comportamiento tangencial del contacto

Cuando se habla del comportamiento tangencial de un contacto, se refiere a la fricción que existe entre las superficies en cuestión. En un extremo se tiene el contacto sin fricción ("Frictionless"), en el cual el coeficiente de fricción μ es nulo, y en el otro el contacto con coeficiente de fricción infinito ("Rough"). ABAQUS permite elegir dicho coeficiente de fricción.

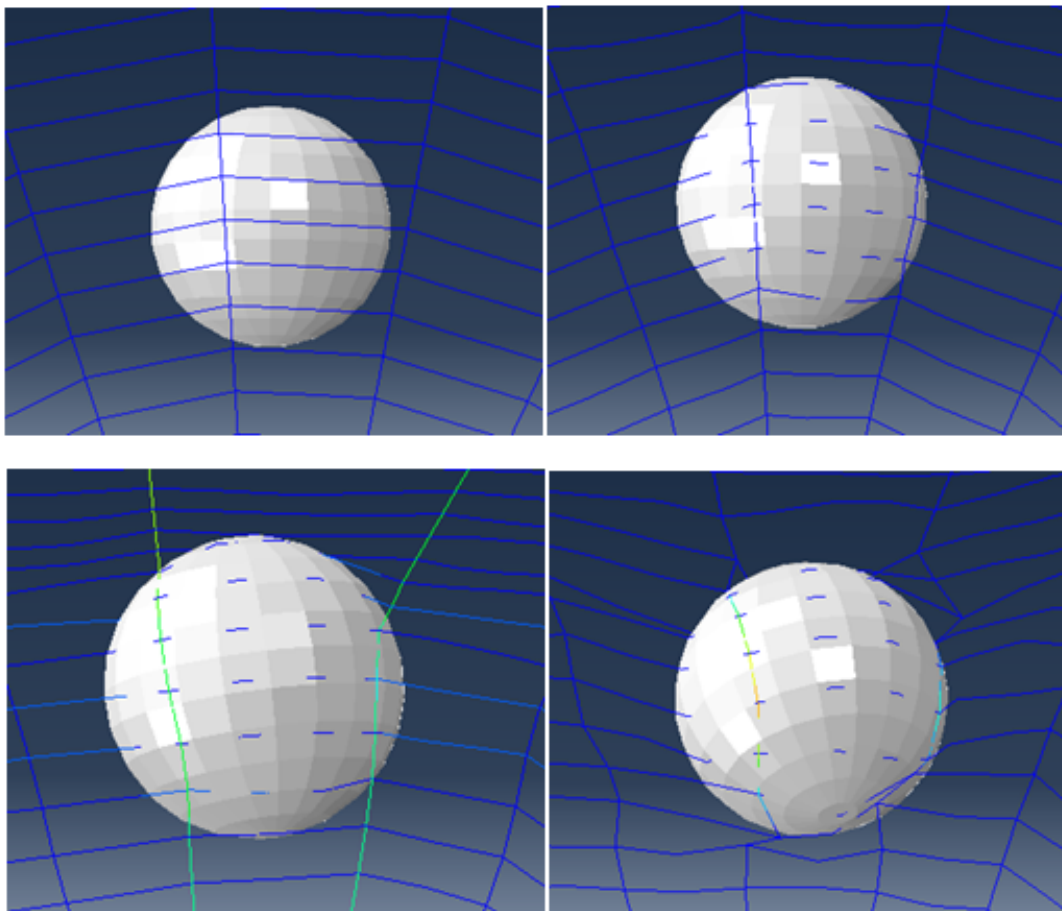


Fig. 3.3 Capturas de imagen de una simulación con contacto tipo Rough ($\mu=\infty$)

Como puede verse en la figura 3.3, no existe ningún desplazamiento relativo entre los hilos de la zona de impacto y la esfera con el contacto de tipo Rough. Si se considera el otro extremo, el comportamiento tangencial del contacto tipo Frictionless hace que la esfera no se quede adherida a la tela (figura 3.4).

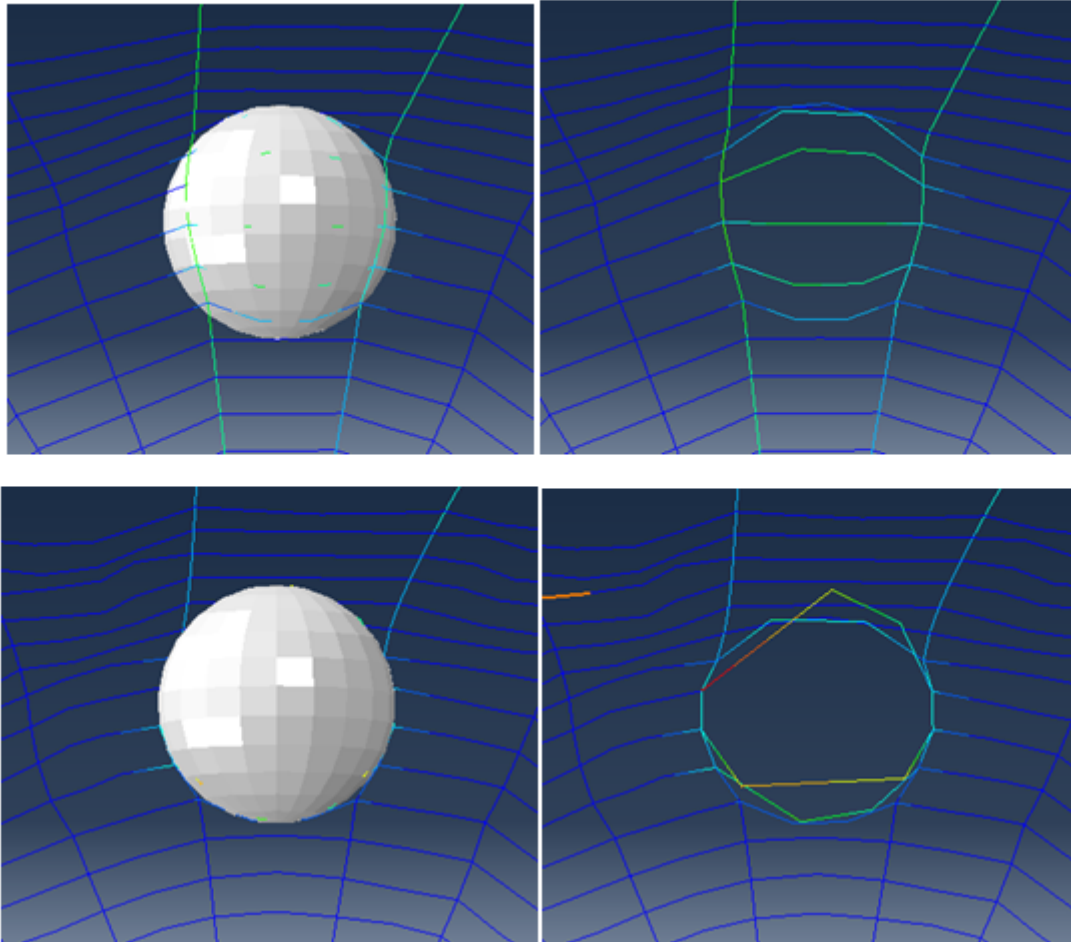


Fig. 3.4 Capturas de imagen de una simulación con contacto tipo Frictionless ($\mu=0$)

ABAQUS también permite introducir un coeficiente de fricción μ entre cero e infinito, que conlleva un desplazamiento relativo entre las superficies, simulando así un contacto pegajoso.

Se ha desechado el tipo de contacto “Frictionless” ya que al no haber rozamiento entre los hilos y la esfera, la tela no es capaz de detenerla. Al no haber encontrado ningún dato sobre el coeficiente de fricción que aparece entre la tela de araña y el insecto, se va a utilizar el comportamiento tangencial de contacto de tipo Rough que no permitirá que haya deslizamiento relativo entre ambos cuerpos, y que además da menos problemas durante las simulaciones.

3.4.2 Comportamiento normal del contacto

Para definir el comportamiento normal del contacto, hay que introducir en ABAQUS la relación Presión – Distancia cuando la esfera que simula el insecto está muy cerca de los hilos de la tela de araña, y también cuando hay penetración entre ambos. Hay varias maneras definir la relación:

- Contacto tipo “Hard contact”: Las superficies estarán en contacto cuando la distancia entre ellas se anula, momento en el cual puede ser transmitida cualquier valor de tensión.
- Contacto definido de forma tabular: Se introducen las coordenadas de los puntos que definirán la relación gráfica Presión – Distancia (Ver figura 3.5)
- Contacto definido mediante una recta: Similar a la forma tabular, pero sólo se introduce un punto en la zona de penetración. El punto de partida es el origen de coordenadas.
- Contacto definido exponencialmente: Se define c_0 (mínima separación para la cual la presión es nula), p_0 (presión de contacto cuando no hay separación) y k_{\max} (rigidez del contacto) (Ver figura 3.6)

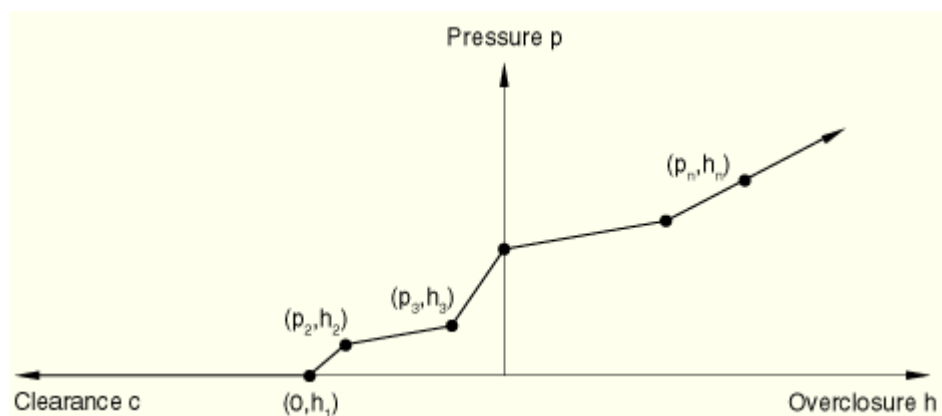


Fig. 3.5 Definición de la componente normal del contacto de forma tabular (manual de usuario de análisis de ABAQUS)

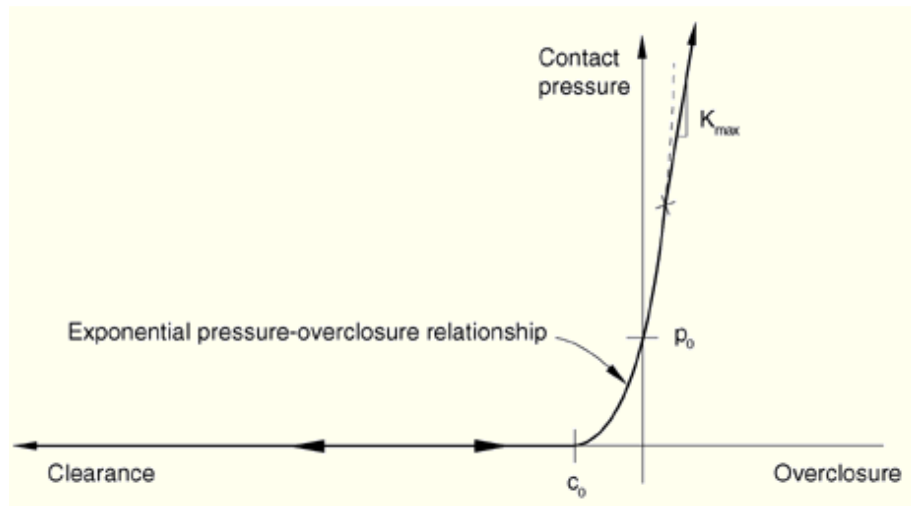


Fig. 3.6 Definición de la componente normal del contacto de forma exponencial (manual de usuario de análisis de ABAQUS)

En este caso, se elegirá el comportamiento normal de contacto tipo “Hard contact”. Tras realizar varias simulaciones de prueba, los otros tipos de definición provocan discontinuidades en alguna de las variables de salida, introduciendo errores en los resultados.

Se puede indicar a ABAQUS que no se desea que las superficies se separen una vez que han estado en contacto. Si se usa esta opción junto al comportamiento tangencial de contacto de tipo “Rough”, la esfera y los hilos de la zona de impacto queden adheridos. No habrá separación ni deslizamiento entre ellos. En las figuras 3.7 y 3.8 pueden verse capturas de imagen de las simulaciones realizadas.

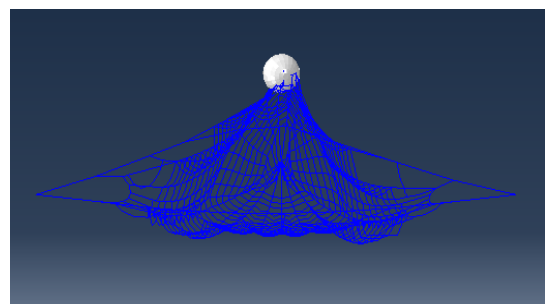
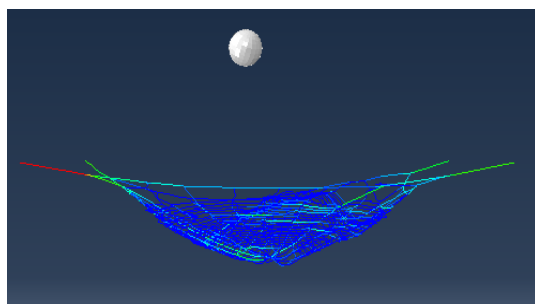
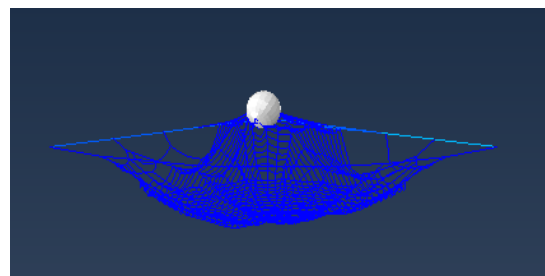
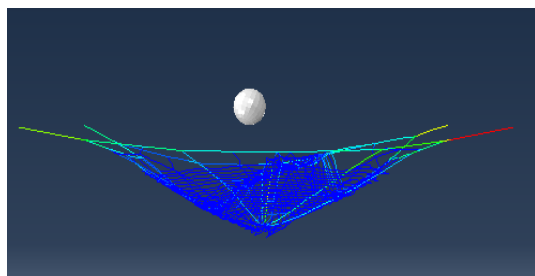
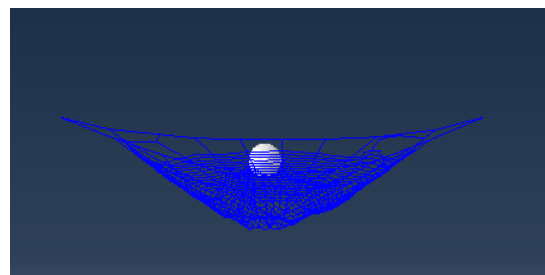
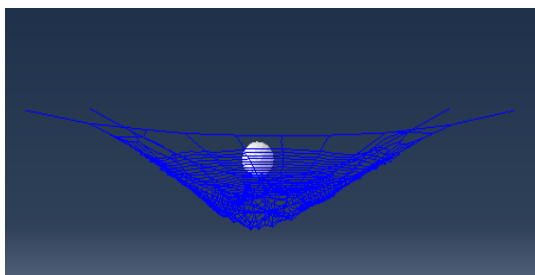
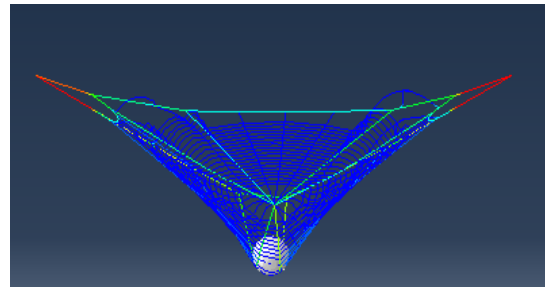
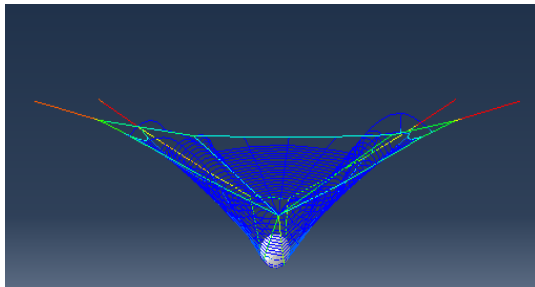
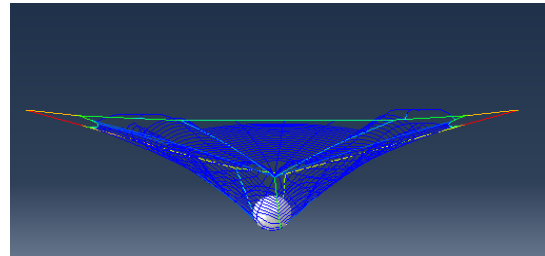
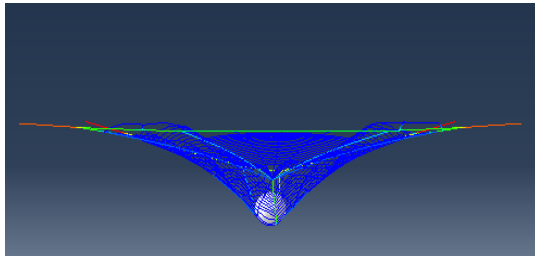
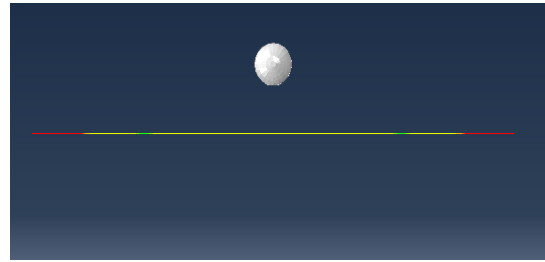
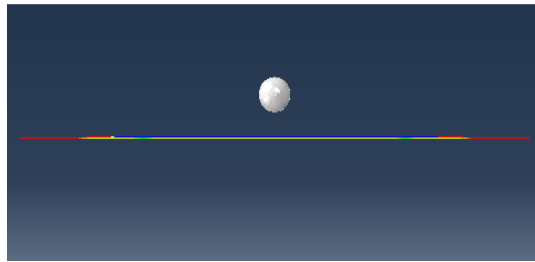


Fig. 3.8 Simulación permitiendo separación

Fig. 3.7 Simulación sin permitir separación

3.5 Pretensión

Hay varias maneras de dar un valor de pretensión a los hilos de la tela de araña con Abaqus. Una de ellas es introducir dichos valores y la región en la que van a ser aplicados. Hay que tener en cuenta que estos valores no van a permanecer constantes, sino que van a ir variando hasta que la tela encuentre un equilibrio estático (antes del impacto). Esta manera de proceder da muchos problemas, por lo que finalmente se ha realizado del siguiente modo:

- 1. Se desplazan los cuatro extremos de la tela de araña en los ejes X e Y
- 2. Se crean apoyos en esos puntos y se finaliza el desplazamiento
- 3. Se espera un tiempo adecuado para que la tela de araña se estabilice

De esta manera se consigue el mismo efecto de pretensión, pero con muchos menos problemas que con el primer método. En la figura 3.9 se ve el proceso de pretensión de tres elementos de distintas regiones, siendo el más pretensado el de los hilos de suspensión, posteriormente el del marco, y por último el de un hilo radial. En este caso, el tiempo de estabilización es inapreciable debido a que la geometría de los hilos radiales es simétrica respecto de los ejes X e Y.

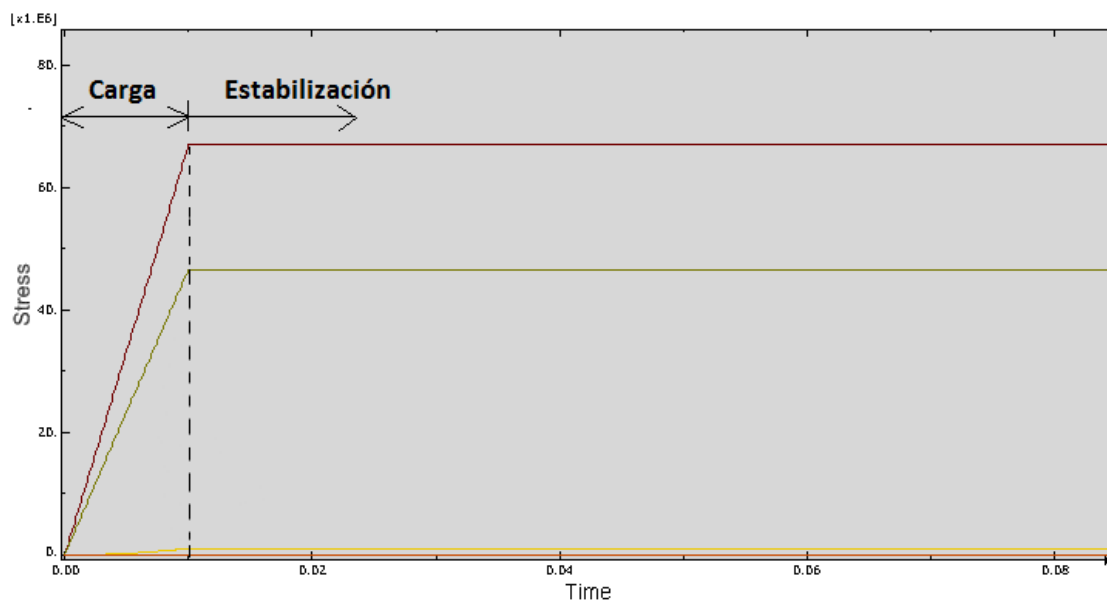


Fig. 3.9 Pretensión de tres elementos de distintas regiones

3.6 Fuerzas aerodinámicas

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). Para el caso concreto de los hilos de una tela de araña, se tiene lo siguiente:

$$Re = \frac{|v|\phi}{\kappa} \quad [4]$$

Siendo κ la viscosidad cinemática del aire ($16 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), ϕ el diámetro del hilo (del orden del micrón) y $|v|$ su velocidad (de hasta unos pocos m/s en el momento del impacto).

Remplazando en [4] obtenemos un número de Reynolds muy próximo a la unidad, por lo que no se puede despreciar el efecto del aire en la amortiguación de la tela de araña.

Para tenerlo en cuenta, se va a utilizar una subrutina tipo VDLOAD desarrollada por el profesor Zaera para introducir en el modelo una fuerza aerodinámica, o fuerza de Drag, definida por la ecuación [5].

$$F_d = -\frac{1}{2} C_d \rho_{aire} \phi v^2 \text{Signo}(v) = -\frac{6.0895 \phi \rho_{aire} v^2 \text{Signo}(v)}{\left(\frac{\phi}{\kappa}\right)^{0.62856} |v|^{0.62856}} = -\frac{6.0895 \phi \rho_{aire} |v|^{1.37144} \text{Signo}(v)}{\left(\frac{\phi}{\kappa}\right)^{0.62856}} \quad [5]$$

Siendo v la velocidad, $\rho_{aire} = 1,225 \text{ kg/m}^3$, y C_d el coeficiente de Drag, que para un cilindro desplazándose transversalmente depende del número de Reynolds Re de acuerdo a la curva de la figura 3.10.

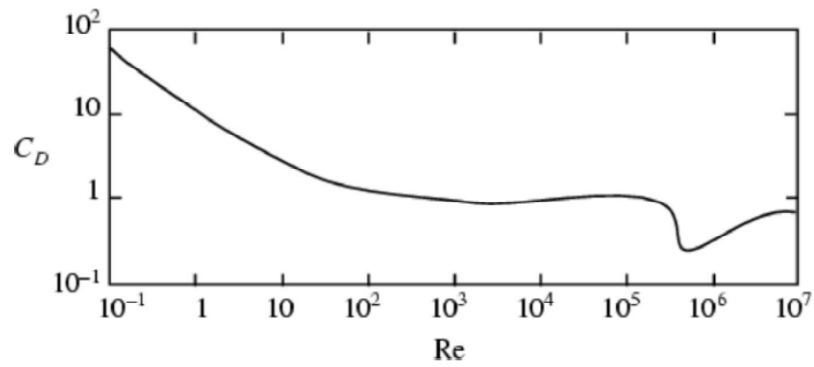


Fig. 3.10 Curva que relaciona el número de Reynolds con el coeficiente de Drag (Tritton, 1988)

Para el rango del número de Reynolds con el que se trabaja, la curva se puede aproximar por la función [6].

$$C_d = 12.179 \cdot \text{Re}^{-0.62856} \quad \text{para } 0.1 < \text{Re} < 10 \quad [6]$$

En términos de la fuerza por unidad de volumen (para un sólido cilíndrico), se obtiene la ecuación [7].

$$f_d = F_d \frac{4}{\pi \phi^2} = - \frac{7.75339 \rho_{\text{aire}} |v|^{1.37144} \text{Signo}(v) \kappa^{0.62856}}{\phi^{1.62856}} \quad [7]$$

Simplemente hay que introducir el valor del diámetro en cada región de la tela y la subrutina hará el resto. En la captura de pantalla de la figura 3.11 puede ver cómo reaccionan los hilos ante la fuerza aerodinámica.

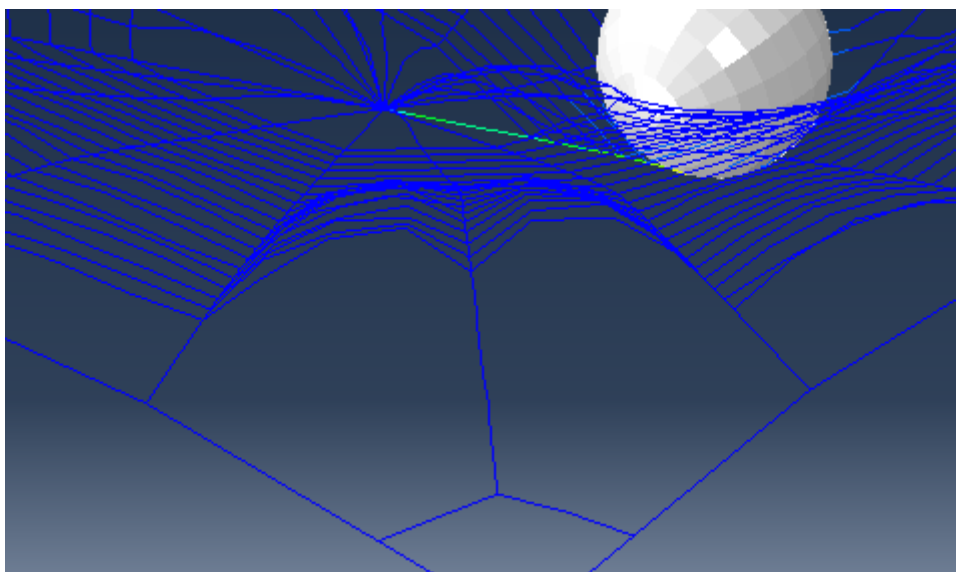


Fig. 3.11 Simulación de un impacto teniendo en cuenta la fuerza aerodinámica

4 Generador del modelo

Para realizar la simulación de un impacto de insecto en una tela de araña, hay que crear previamente el modelo completo con el programa ABAQUS. Dada la complejidad de la geometría, si tuviese que realizarse manualmente requeriría un tiempo excesivo. Por otra parte los objetivos del proyecto requieren de la realización de numerosas geometrías, por lo que se van a utilizar unos scripts en lenguaje Python, y de esta manera se automatizará gran parte de la tarea. Siguiendo los pasos adecuado, se podrá crear un modelo listo para poder lanzar simulaciones en menos de un minuto.

La tela de araña que puede ser creada con este generador tiene las siguientes características:

- Cuatro puntos de anclaje
- Marco cuadrado
- Hilos radiales equiespaciados
- Los hilos radiales siguen una espiral arquimedean (Vollrath & Mohren, 1985)
- Tres diferentes zonas en la espiral (aunque finalmente sólo se haya utilizado una)

En el primer apartado se explicará la metodología a seguir para la creación de un modelo completo de tela de araña con impacto de un insecto. En los apartados posteriores se explicará con más detalle qué función tiene cada script y como utilizar la hoja de Excel correspondiente.

4.1 Metodología para crear un modelo completo

Gracias a la automatización de gran parte del trabajo, se va a poder crear un modelo de tela de araña de manera muy sencilla. Solamente hay que seguir los pasos definidos en los apartados del 4.1.1 al 4.1.7.

4.1.1 Introducción de los parámetros

Habrà que introducir en la tabla 4.1 todos los parámetros necesarios para la creación de los materiales de los hilos, la geometría de la tela, el insecto, los steps y la pretensión. En los apartados 4.2, 4.3 y 4.4 se explicará con detalle a que corresponde cada variable.

[illegible]

Tabla 4.1 Hoja de Excel con todos los parámetros necesarios para la creación del modelo

Hay que tener en cuenta que dicha hoja de Excel tiene que llevar por nombre “book2.xls” y debe encontrarse en la carpeta de Abaqus. Será también necesario tener instalados los módulos correspondientes a la lectura de hojas de Excel desde Python para ABAQUS.

4.1.2 Ejecución del primer script “Geometria.py”

Tras completar todos los datos necesarios, hay que abrir el CAE de Abaqus, y ejecutar el primer script abriendo el menú “file” y haciendo click en “Run Script...”. Se escogerá el script llamado “Geometria.py” (Figura 4.1).

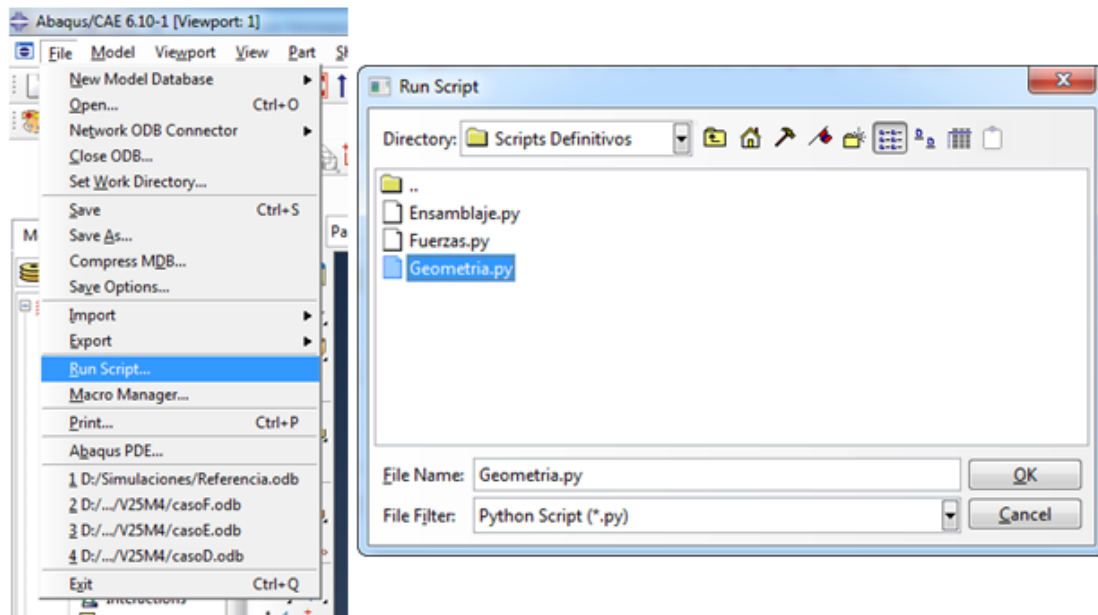


Fig. 4.1 Ejecución del primer script

De esta manera se crearán las diferentes regiones de la tela de araña.

4.1.3 Asignación de secciones a las diferentes regiones

En el módulo “Property” del CAE, se asigna la sección correspondiente a cada región de la tela. Para ello, en el menú “Assign” se hace click en “Section” y se seleccionan de una en una todas las partes del modelo, asignándole la sección correspondiente (Figura 4.2).

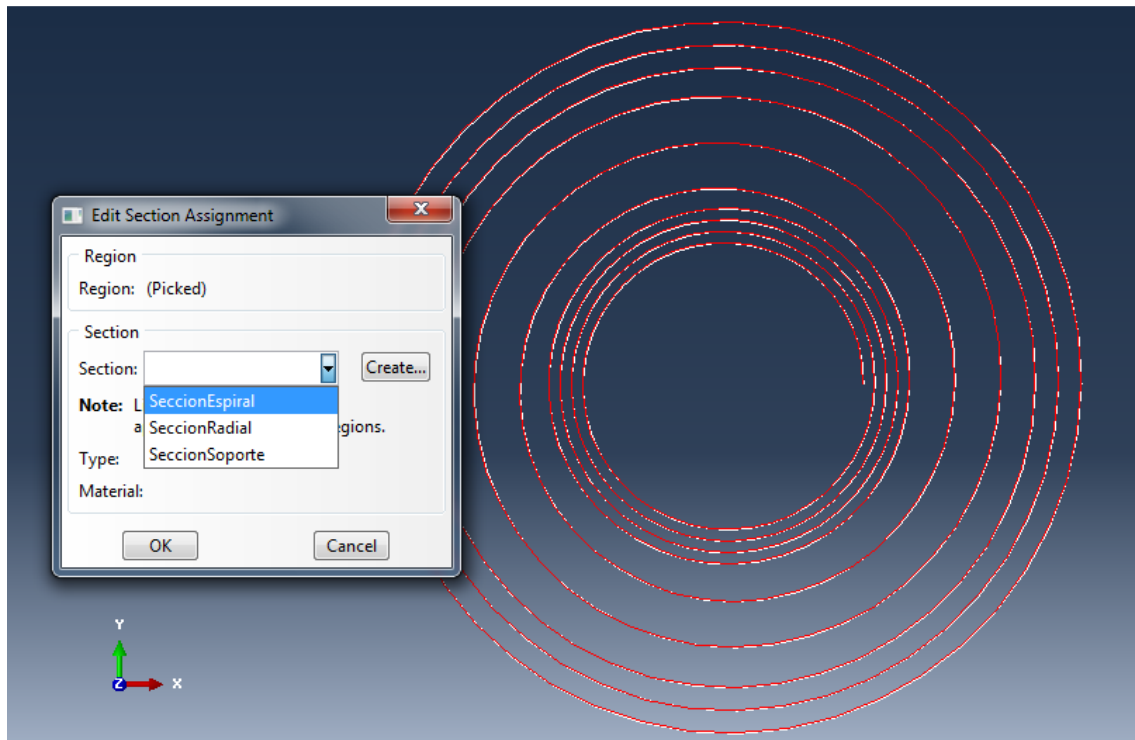


Fig. 4.2 Asignación de secciones a las diferentes regiones de la tela

4.1.4 Ejecución del segundo script “Ensamblaje.py”

De la misma manera que se hizo para el primer script, se ejecuta ahora “Ensamblaje.py”.

4.1.5 Creación del set “SETFUERZAS”

Para que el siguiente script cree las fuerzas y apoyos en los puntos deseados, habrá que definir un set llamado “SETFUERZAS”. Esto se consigue en el módulo “Load”, en el menú “Tools” y haciendo click “Set/Create...”. Se da el nombre deseado, y después se seleccionan los extremos de los hilos de suspensión. Tras estos pasos, solamente habrá que pulsar el botón Enter (Figura 4.3).

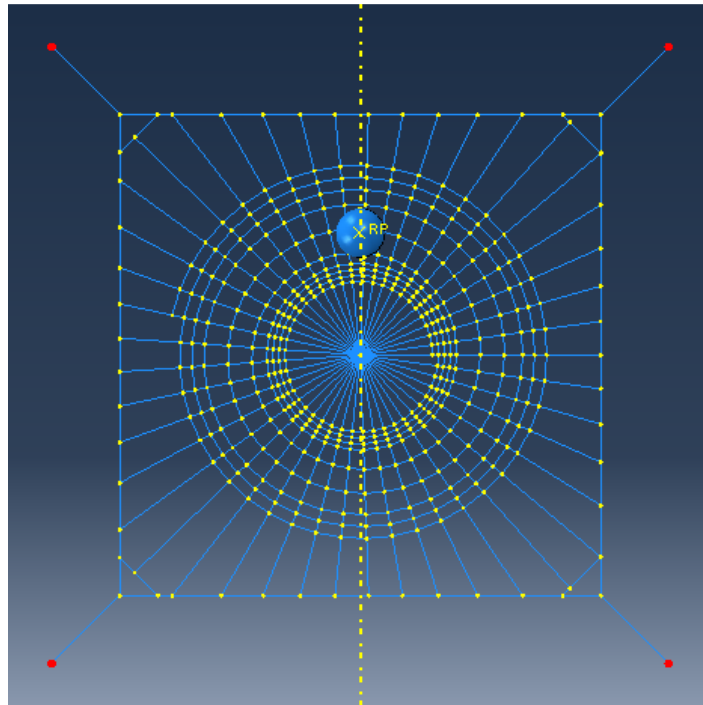


Fig. 4.3 Creación del set "SETFUERZAS"

4.1.6 Ejecución del tercer script "Fuerzas.py"

Como se ha hecho con anterioridad, se ejecuta el script "Fuerzas.py"

4.1.7 Mallado del modelo y creación de la interacción y de los sets de las distintas regiones de la tela

En el módulo "Interaction", se crea la interacción de tipo "Surface-to-surface contact" seleccionando primero la esfera y después la tela de araña.

En el módulo "Mesh" se malla el modelo de la tela de araña, eligiendo el elemento T3D2.

En el mismo módulo, va a haber que crear tres sets correspondientes a las tres regiones de hilos de la tela para posteriormente asignar las condiciones iniciales necesarias y la fuerza aerodinámica correspondiente. Se van a crear igual que se hizo para el caso del set "SETFUERZAS", pero esta vez se elegirá el tipo de set de elementos (antes no aparecía esta opción ya que no se había mallado todavía). Para poder seleccionar con facilidad las distintas regiones, se puede crear un grupo de visualización. En la opción "Internal sets", aparecerán tres sets cuyos nombres

empiezan por “Conjunto-1.” que han sido previamente utilizados por el script, y cada uno corresponde con una región de la tela.

Los nombres que hay que dar a estos sets tienen que ser los mismos que luego se utilicen para asignar las condiciones iniciales y fuerza aerodinámica. En este proyecto, se han utilizado “SET1” “SET2” y “SET3” respectivamente para las regiones “Espiral”, “Radial” y “Marco” (Figura 4.4).

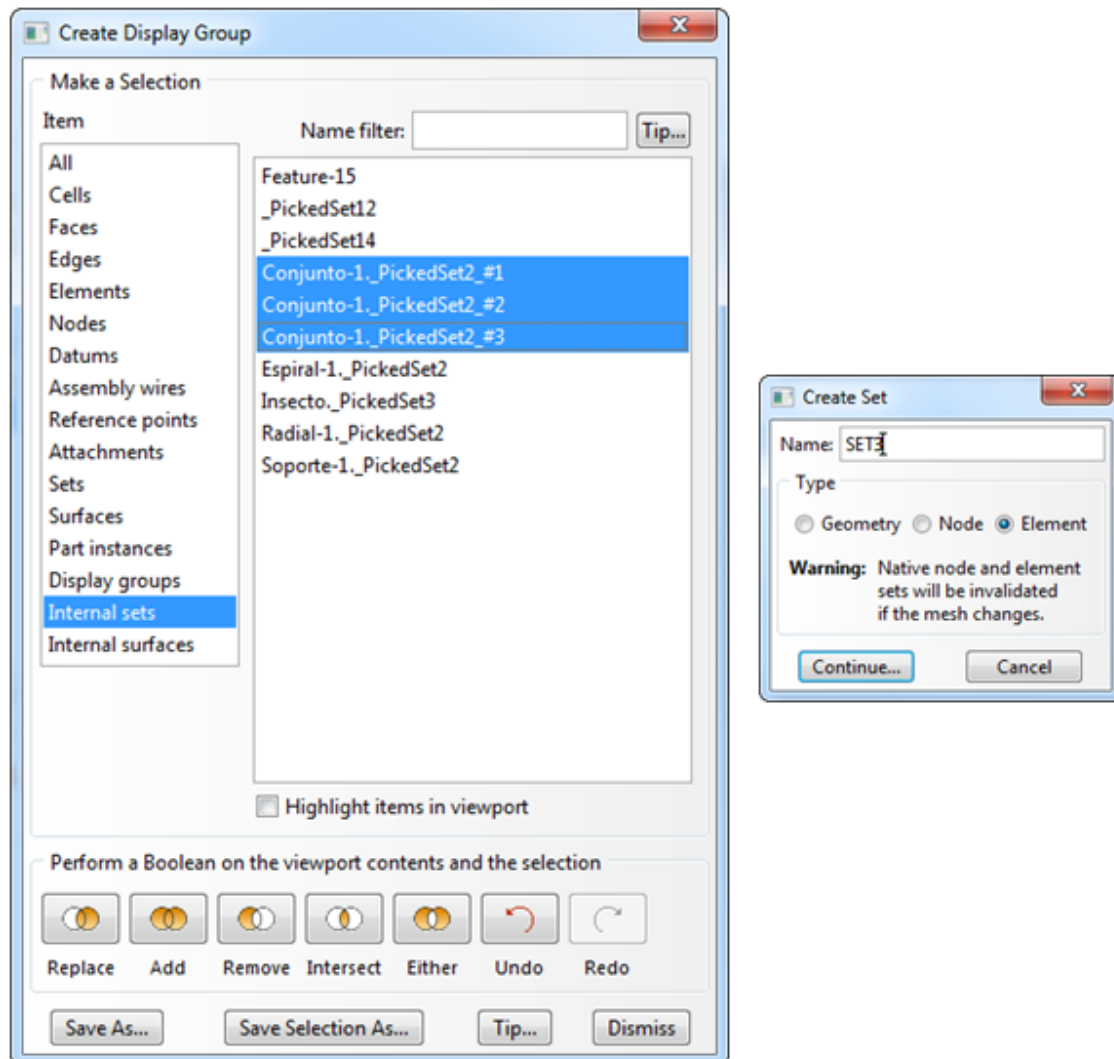


Fig. 4.4 Creación de sets de las distintas regiones de la tela de araña

Únicamente faltaría introducir las condiciones iniciales y la fuerza de rozamiento en el archivo “.inp” para tener el modelo completo.

4.2 Primer script:

En este primer script se va a crear la geometría de la tela de araña así como los materiales, los hilos, y sus propiedades.

4.2.1 Creación de los materiales

En la hoja de Excel, va a haber que introducir todas las variables que necesita la subrutina de usuario vista en el capítulo anterior para definir el comportamiento de cada uno de los materiales. En la tabla 4.2 se puede ver un ejemplo.

		3	4	5
	Propiedades	Espiral	Radial	Soporte
3	Diámetro	2.3000E-06	3.5000E-06	5.0000E-06
4	Area	4.1548E-12	9.6212E-12	1.9635E-11
5	Tensión 1	3.0000E+07	2.7500E+08	2.7500E+08
6	Deformación 1	0.0250	0.0250	0.0250
7	Tensión 2	4.0000E+07	3.0000E+08	3.0000E+08
8	Deformación 2	1.5000	0.1200	0.1200
9	T2	5.6000E+08	5.0000E+09	5.5550E+09
10	Def. de rotura	2.5000	0.3000	0.3000
11	Parámetro 8	0.0010	0.0010	0.0010
12	Parámetro 9	0.1200	0.1200	0.1200
13	Parámetro 10	1.0500	1.0500	1.0500
14	Parámetro 11	0.1000	0.1000	0.1000

Tabla 4.2 Zona de la hoja de Excel con las propiedades de los materiales

Posteriormente, si hay que modificar alguna propiedad antes de lanzar una simulación, se puede hacer directamente en el CAE de Abaqus. Las propiedades que aparecerán son las que fueron definidas anteriormente (figura 4.5).

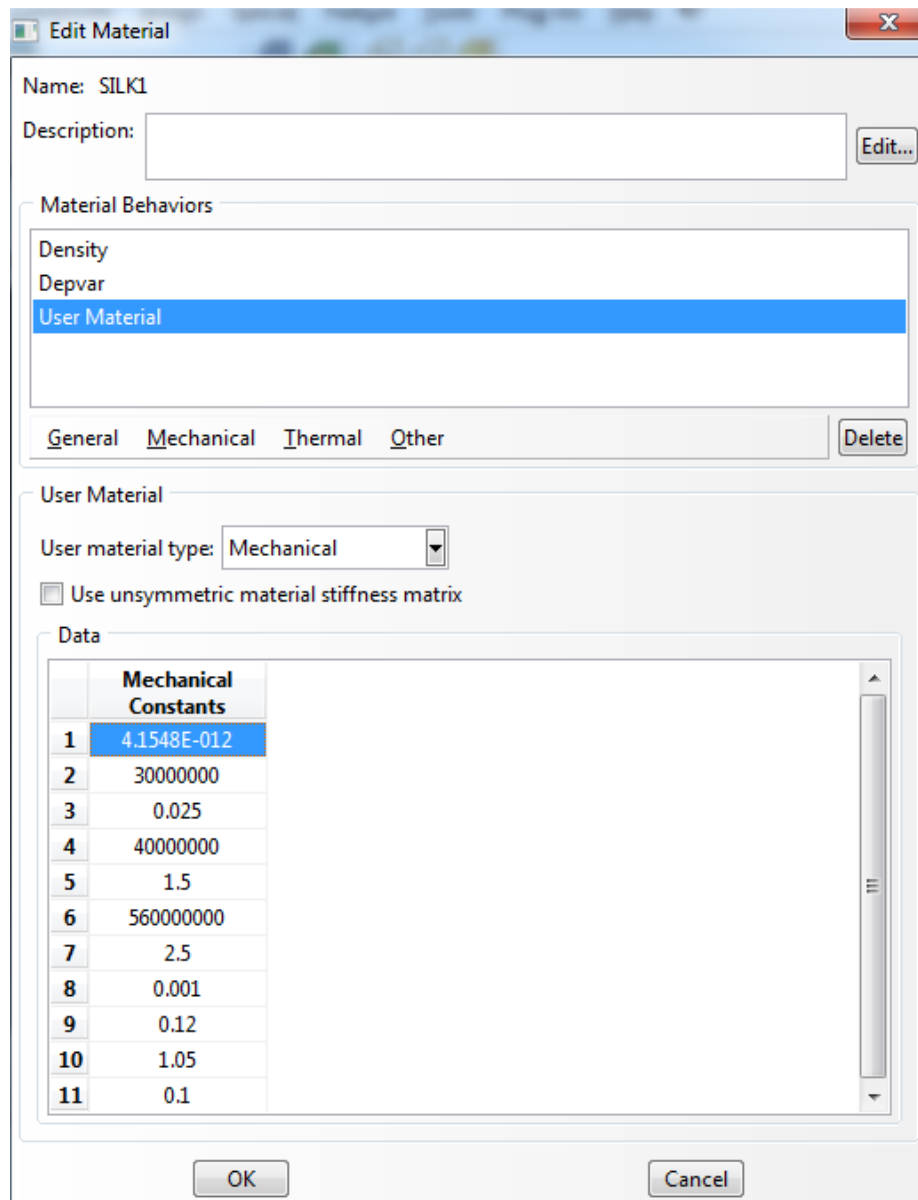


Fig. 4.5 Edición de las propiedades del material en el CAE de Abaqus

La densidad de los hilos de la tela de araña viene prefijada dentro del script, y también sería fácilmente modificable en el CAE de Abaqus en el caso de que fuera necesario. Si hubiera que cambiar dicho valor en muchas simulaciones, convendría modificar en el script las líneas de código correspondientes para así ahorrar tiempo.

4.2.2 Creación de las secciones

Cada material tiene asignada una sección, que viene totalmente definida con su área transversal. El script se encargará de la asignación, y no hará falta volver a definir el área ya que se reutilizan las variables introducidas en la hoja de Excel anteriormente (figura 4.6).

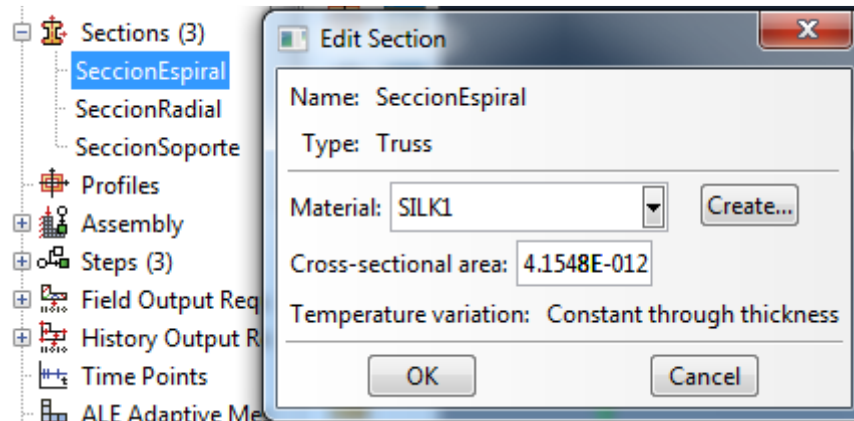


Fig. 4.6 Edición del área transversal de la sección asignada a un material

4.2.3 Creación del marco

Con este script, solamente van a poder crearse telas de araña cuyos marcos sean cuadrados (figura 4.7). En la hoja de Excel habrá que introducir únicamente la dimensión correspondiente al lado del marco (tabla 4.3).

	9
	Lado
10	0.2

4.3 Definición de la dimensión del lado del marco en la hoja de Excel

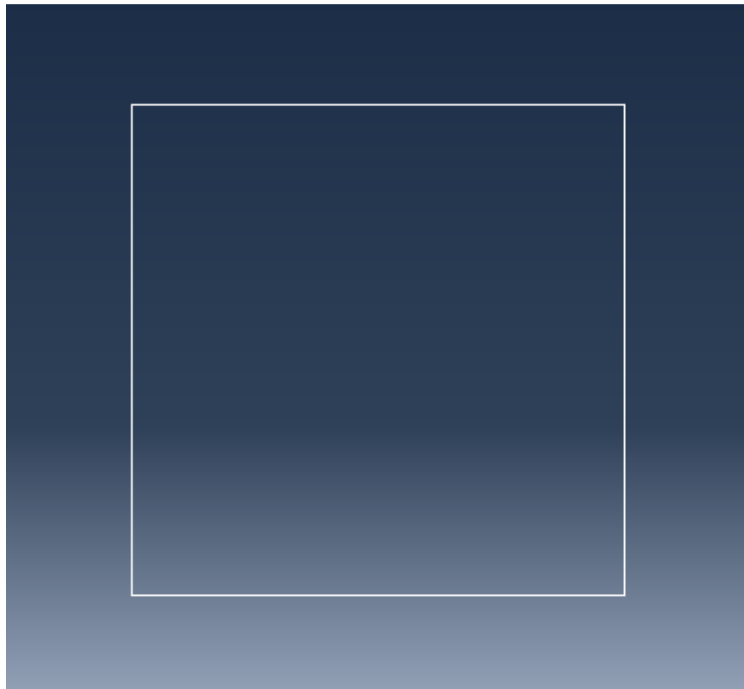


Fig. 4.7 Marco de la tela de araña

4.2.4 Creación de los hilos del marco secundario

Se va a poder elegir si se quiere que el modelo de la tela de araña tenga marco secundario o no. Simplemente habrá que asignar el valor de 1 a la variable “Marco Secundario” en caso afirmativo, y “0” en caso negativo (figura 4.8).

Si se elige la opción de tela con marco secundario, se va a poder ajustar la longitud de sus hilos gracias a la modificación del “Ángulo del marco secundario” definido en la hoja de Excel (figura 4.8).

	9		10
	Marco Secundario		Ángulo Marco S.
4	1	10	0.7

Fig. 4.8 Parámetros que definen el marco secundario

El ángulo en cuestión tendrá que estar entre 0 y $\pi/4$ radianes, y corresponde al ángulo que puede verse en la figura 4.9.

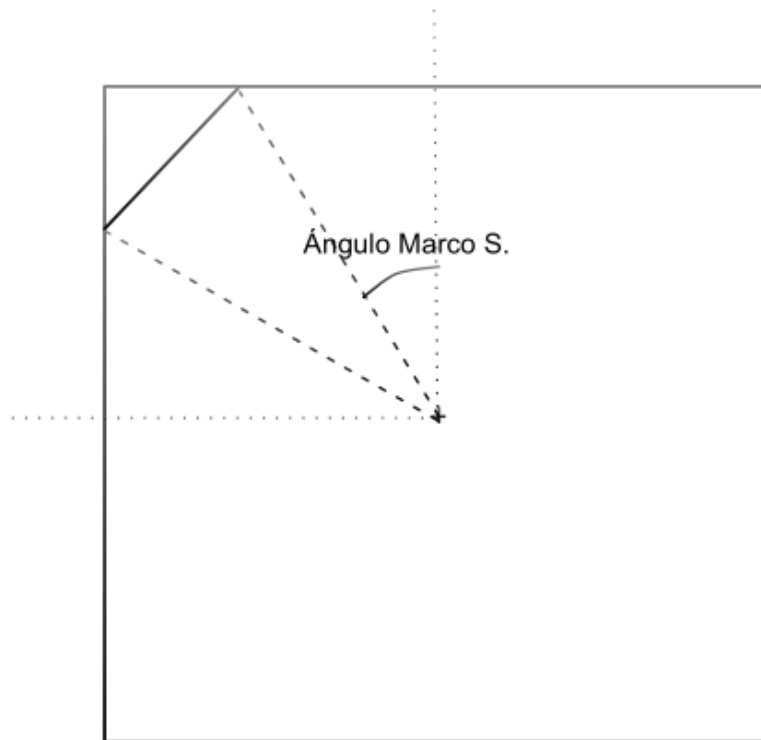


Fig. 4.9 Definición del ángulo del marco secundario

De esta manera, se obtiene una gran versatilidad al poder crear telas de araña sin marco secundario, o con uno con las dimensiones deseadas (figura 4.10).

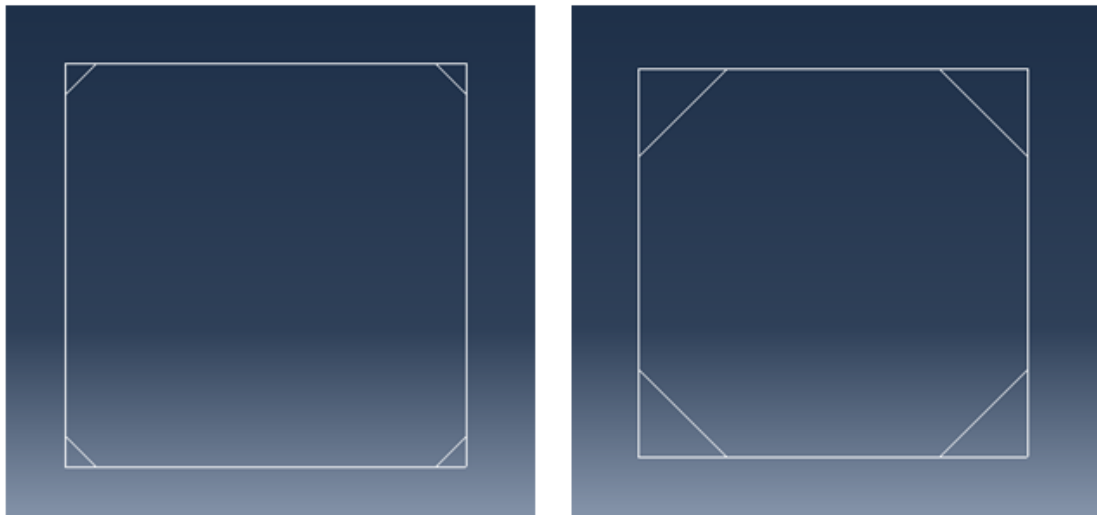


Fig. 4.10 Modelos con diferentes ángulos del marco secundario: 0,7 rad (izquierda) y 0,5 rad (derecha)

4.2.5 Creación de los hilos de suspensión

Para definir por completo los hilos de suspensión, el script necesita únicamente su longitud, que habrá que introducir en las celdas de la tabla 4.4.

	10
	Long. Hilos Susp.
4	0.04

Tabla 4.4 Parámetro que define la longitud de los hilos de suspensión

Como se puede ver en la figura 4.11, éstos forman 45° con la vertical, y si se prolongaran la intersección sería en el origen de coordenadas. En el caso de querer modelizar una tela de araña con los hilos de suspensión con una inclinación diferente, habría que modificar las correspondientes líneas de código del script.

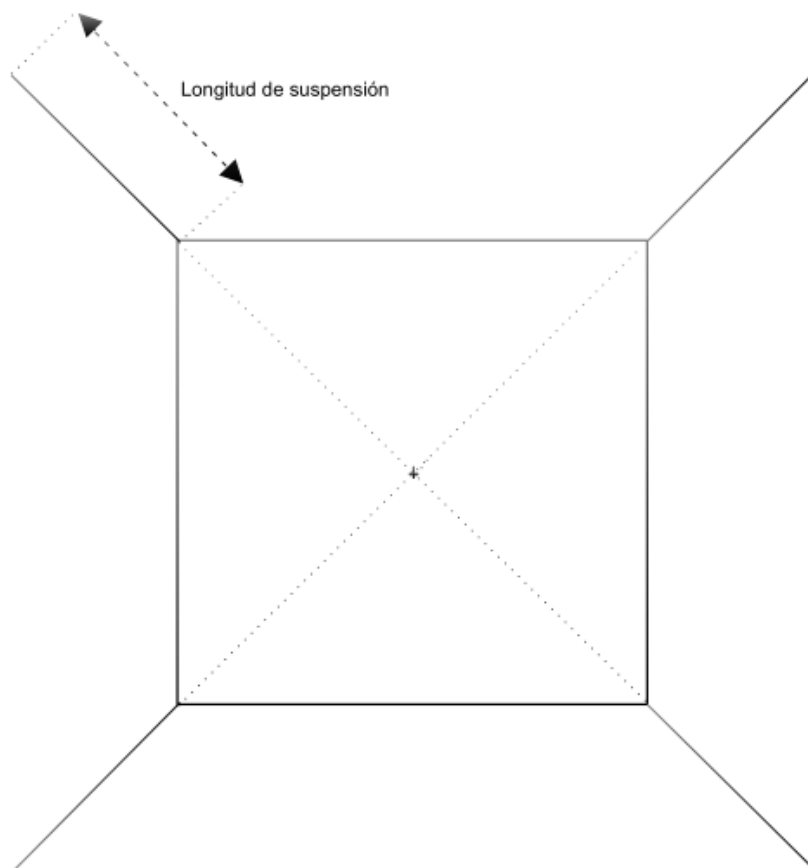


Fig. 4.11 Longitud de los hilos de suspensión

En la figura 4.12 pueden verse dos modelos con distintas longitudes de hilos de suspensión.

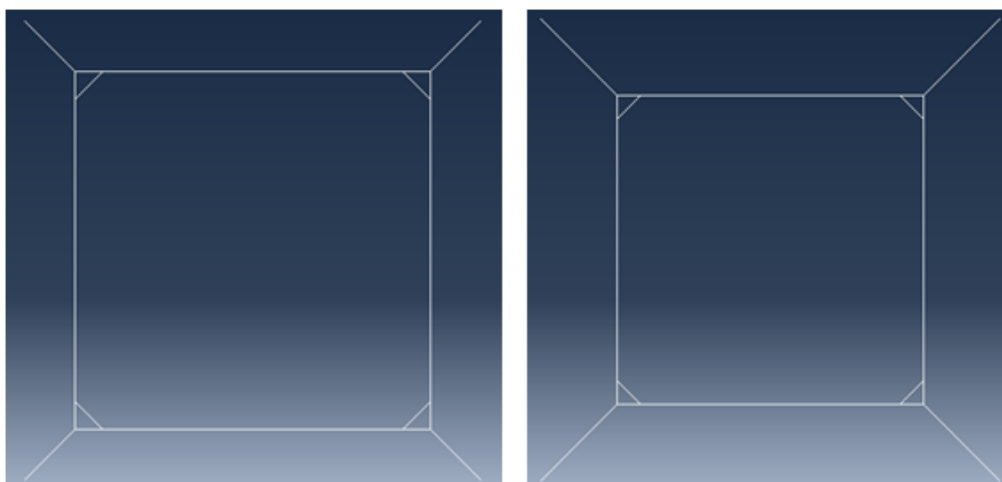


Fig. 4.12 Modelos con diferentes longitudes de los hilos de suspensión: 0,04 m (izquierda) y 0,07 m (derecha)

4.2.6 Creación de los hilos radiales

En la hoja de Excel se va a poder elegir el número de radios de la tela de araña. Es el único dato que hará falta ya que el punto de partida de todos los hilos radiales es el centro del marco (que coincide con el origen de coordenadas), y el punto final es su intersección con los hilos del marco primario o secundario (en caso de que éstos estén presentes al tener la variable “Marco secundario” el valor de 1).

	8
	Nº de Radios
4	38

Tabla 4.5 Parámetro que define el número de hilos radiales presentes en el modelo

En las figuras 4.13 y 4.15 se pueden ver distintos modelos de la tela de araña gracias a diferentes combinaciones de los parámetros.

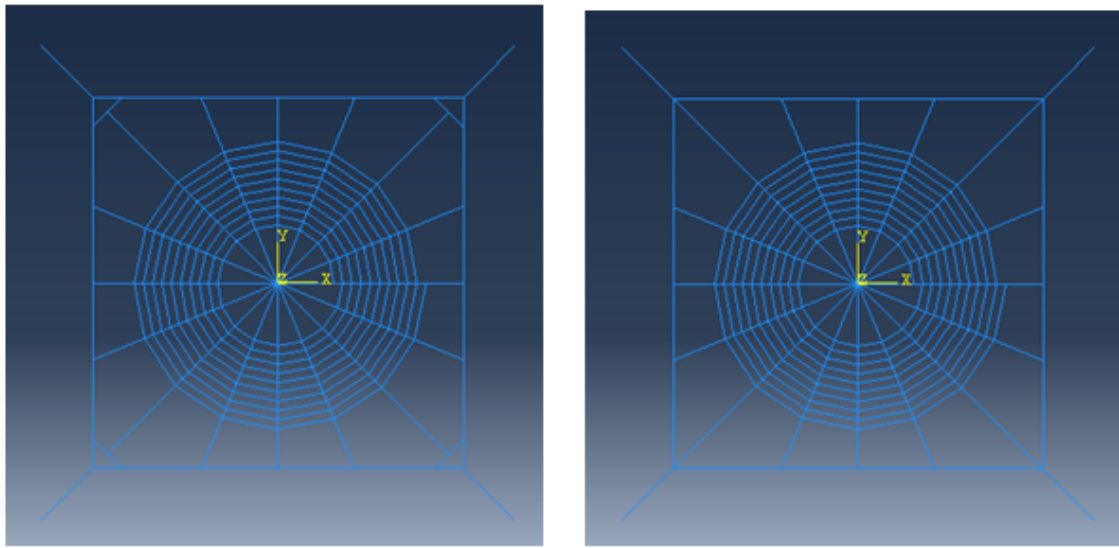


Fig. 4.13 Modelo de la tela de araña con 16 hilos radiales con marco secundario (izquierda) y sin él (derecha)

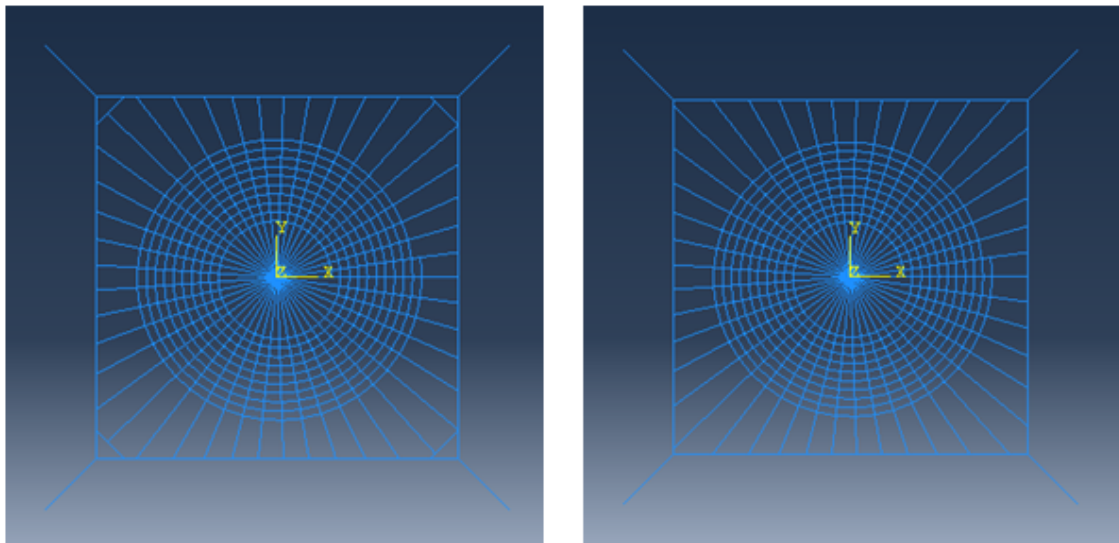


Fig. 4.14 Modelo de la tela de araña con 45 hilos radiales con marco secundario (izquierda) y sin él (derecha)

4.2.7 Creación de los hilos de la espiral

Los parámetros que van a ser necesarios para definir por completo la geometría de los hilos espirales de la tela de araña son:

- Longitud tramo i: Es la longitud en dirección radial que define la extensión de la zona i de hilos espirales
- Paso espiral zona i: Es la distancia en dirección radial entre un hilo espiral y el siguiente de la zona i
- Principio de la espiral: Es la distancia en dirección radial existente entre el origen de coordenadas y el primer hilo espiral

Para comprender mejor estas variables, se proporciona el esquema de la figura 4.15.



Fig. 4.15 Esquema explicativo de las variables usadas para definir los hilos espirales

Todos estos parámetros se introducen en las siguientes celdas de la hoja de Excel expuestos en la tabla 4.6.

	8	9	10	11
6	Longitud tramo 1	Longitud tramo 2	Longitud tramo 3	Principio de la espiral
7	0.0502	0	0	0.03
8	Paso espiral zona 1	Paso espiral zona 2	Paso espiral zona 3	
9	0.005	0.01	0.01	

Tabla 4.6 Parámetros necesarios para definir la geometría de los hilos de la espiral

Hay que tener claro que los hilos de la espiral de la tela de araña no forman una espiral propiamente dicha. Una espiral es una línea curva generada por un punto que se va alejando progresivamente del centro a la vez que gira alrededor de él. En el caso de la tela, la espiral está formada por una consecución de rectas de tal manera que:

- Una recta empieza en el punto en el que termina la recta anterior
- Los puntos inicial y final de toda recta estarán en dos hilos radiales consecutivos
- La distancia entre el centro y el punto final de una recta será la suma de la distancia entre el centro y el punto inicial más un diferencial determinado en el script gracias a los parámetros definidos en la hoja de Excel

En la figura 4.16 puede verse un tramo de hilo espiral.

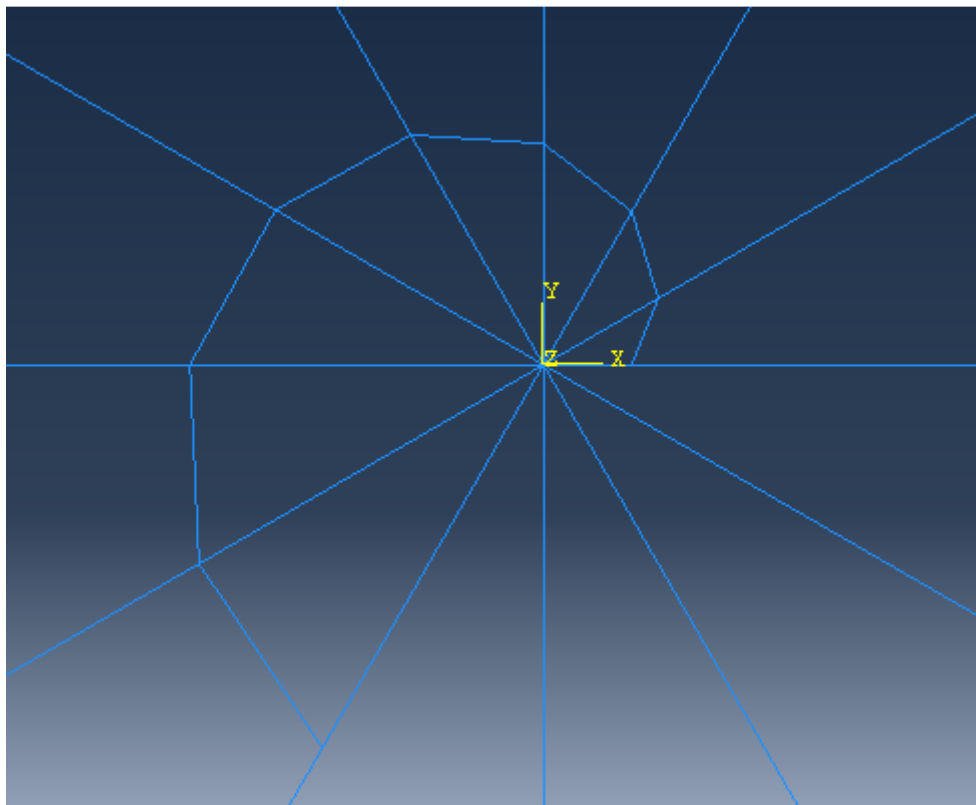


Fig. 4.16 Creación de los hilos de la espiral

4.3 Segundo Script

En este segundo script van a ser ensambladas las diferentes regiones de hilos de la tela de araña y se crearán los “steps” necesarios, la esfera que modelizará el insecto y las propiedades del contacto.

4.3.1 Ensamblaje de las distintas partes

Con el script anterior se crean por separado las diferentes regiones de la tela de araña (figura 4.17). Una vez definidas las propiedades de cada región, hay que ensamblarlas para que funcionen en conjunto e interactúen entre ellas (figura 4.18).

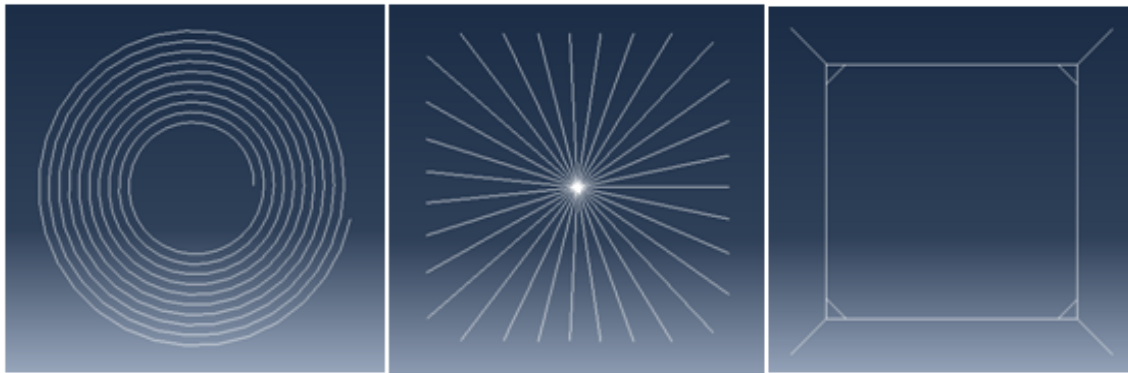


Fig. 4.17 Diferentes partes de la tela de araña

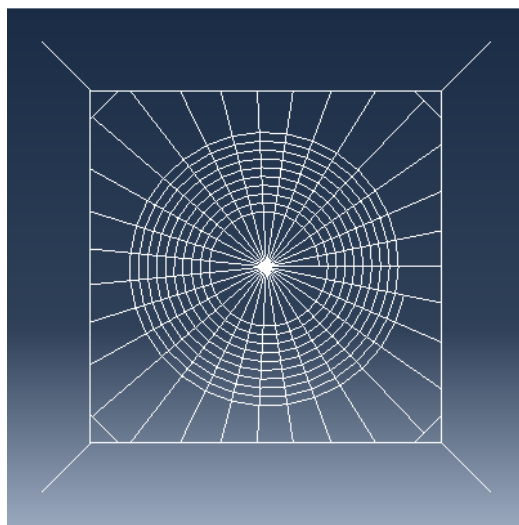


Fig. 4.18 Ensamblaje de las distintas partes

4.3.2 Creación de los steps del modelo

Hay que definir correctamente los “steps” ya que son los que determinan la duración de la simulación, el número de datos que se guardan y la viscosidad del modelo con la que se trabaja. Todos estos parámetros se ajustan en la hoja de Excel, como puede verse en la tabla 4.7.

		3	4	5
	Propiedades	Step 1	Step 2	Step 3
22	Tiempo	0.001	0.1	1
23	Linear Viscosity	0.06	0.06	0.06
24	Quad. Viscosity	1.2	1.2	1.2
25	N. Intervalos	1	5	5

Tabla 4.7 Parámetros que definen las propiedades de los steps del modelo

Se crearán los tres steps únicamente si se considera un modelo con cierta pretensión (o lo que es lo mismo, el parámetro “Pretensión” de la hoja de Excel igual a 1). En caso contrario, el script creará solamente los dos primeros steps.

Si una vez generado todo el modelo hay que modificar algún dato de un step, se puede hacer de manera muy sencilla en el CAE de Abaqus (figura 4.19).

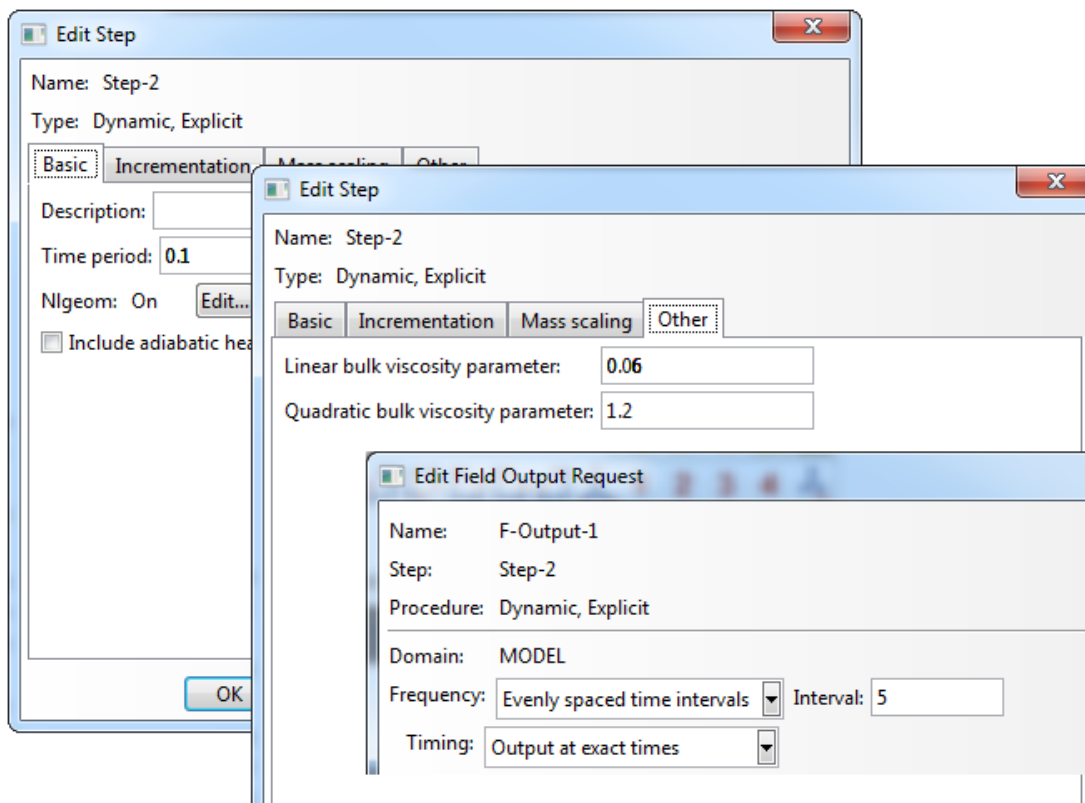


Fig. 4.19 Edición de las propiedades de un step en el CAE de Abaqus

4.3.3 Creación de la esfera

El insecto va a ser modelizado por una esfera analítica rígida (figura 4.20), por lo que habrá que saber su masa que podrá ser modificada fácilmente en la hoja de Excel. En cambio, el radio de la misma es de 1 centímetro y dicho valor viene prefijado en el script. En caso de querer un insecto de dimensiones mayores, habría que recurrir a modificar las líneas correspondientes. Al fijar estos dos valores, la hoja de Excel calcula los momentos de inercia, necesarios para definir completamente el insecto. Aparte, hay que introducir las coordenadas iniciales del centro de la esfera, que junto a la velocidad inicial (explicada en el tercer script) determinarán el punto de impacto. Las variables se introducen en la hoja de Excel tal y como puede verse en la tabla 4.8.

	8	9	10
	Masa insecto		
14	0.00003		
15	Traslación en X	Traslación en Y	Traslación en Z
16	0	0.05	0.012
17	Inercia 1	Inercia 2	Inercia 3
18	1.20E-09	1.20E-09	1.20E-09

Tabla 4.8 Parámetros que definen las propiedades del insecto

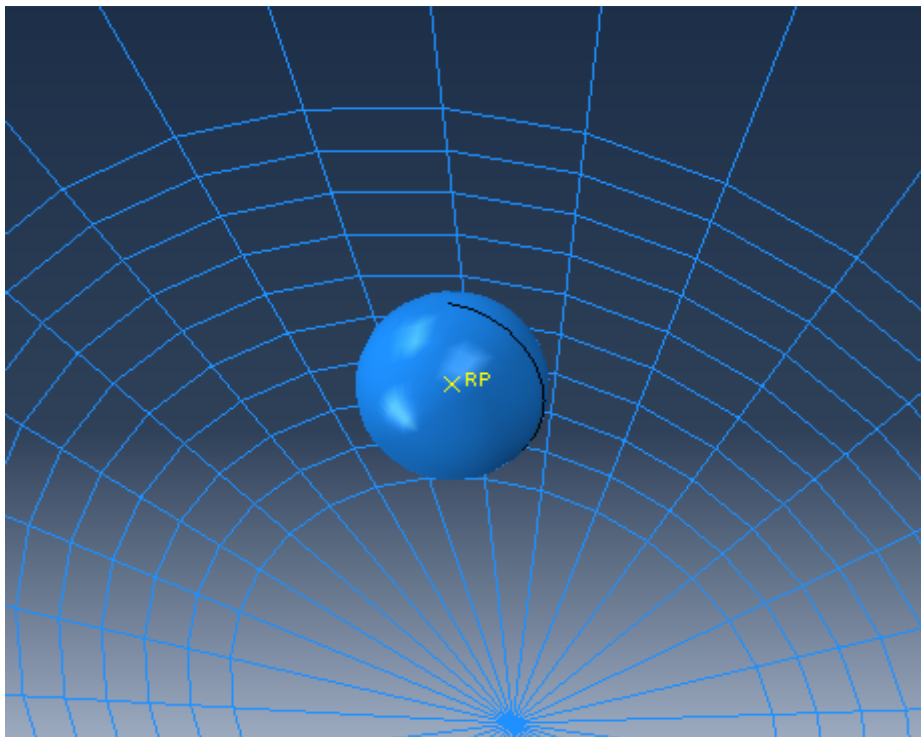


Fig. 4.20 Esfera analítica rígida que modeliza el insecto

4.3.4 Creación de las propiedades del contacto

Como ya se ha dicho anteriormente, el contacto se define con la ayuda de su comportamiento normal y tangencial. Usaremos el tipo “Hard Contact” permitiendo la separación entre los dos cuerpos para el comportamiento normal, y formulación de fricción tipo “Rough” para el comportamiento tangencial. Si fuera necesario cambiar alguna de las propiedades del contacto, se podría hacer fácilmente en el CAE de Abaqus (ver figuras 4.21 y 4.22).

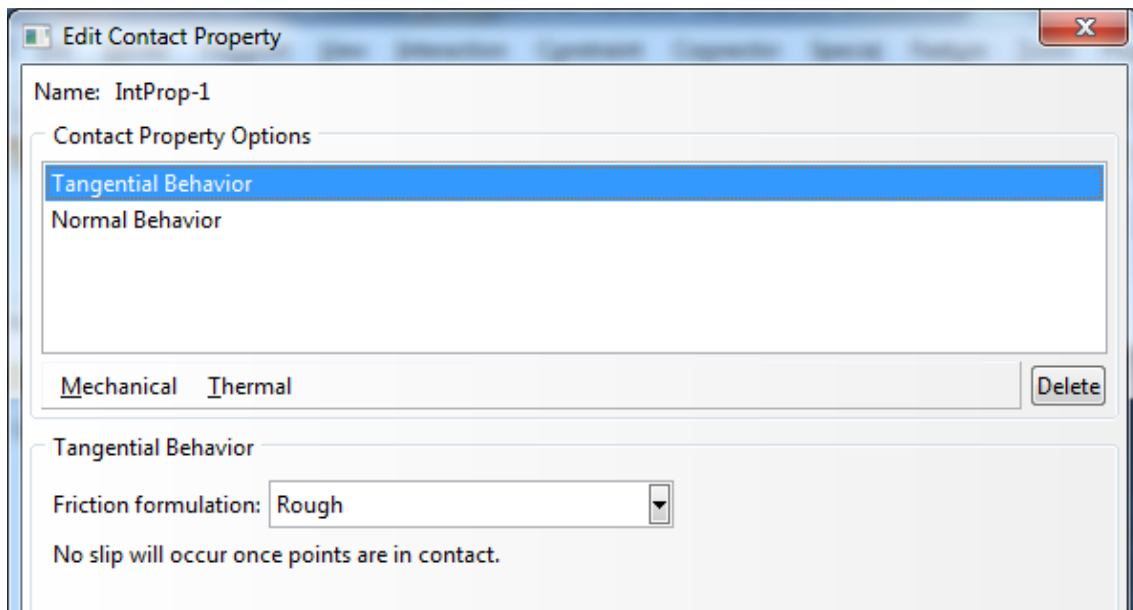


Fig. 4.21 Edición del comportamiento tangencial del contacto

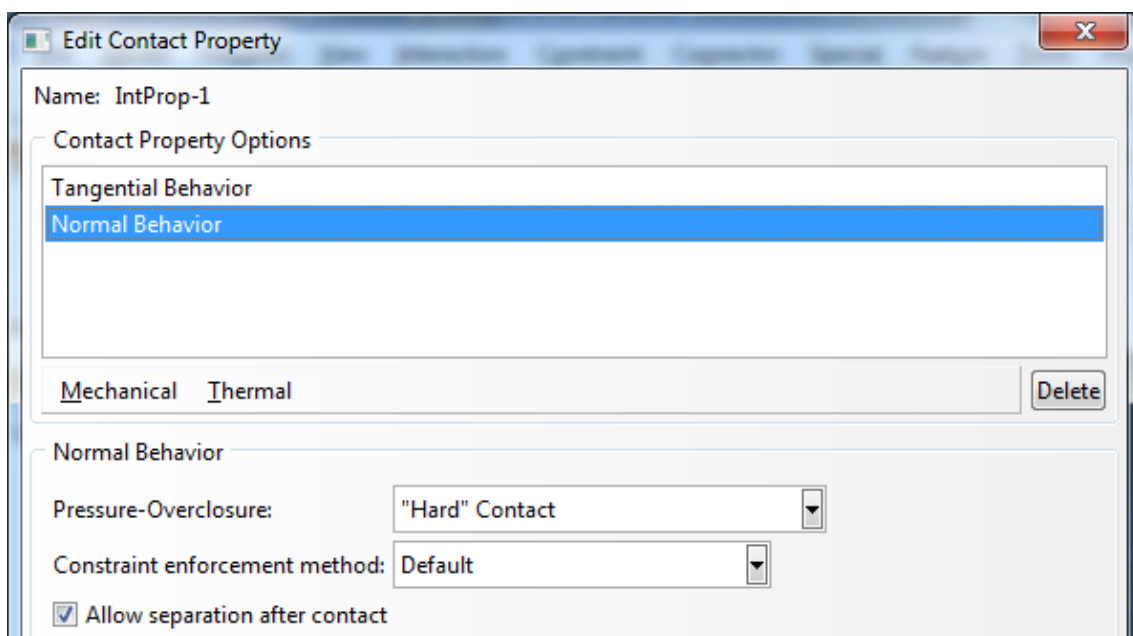


Fig. 4.22 Edición del comportamiento normal del contacto

4.4 Tercer script

En este tercer y último script se van a crear las fuerzas y condiciones de frontera presentes en el modelo. En la hoja de Excel habrá que definir la velocidad inicial de la esfera, como puede verse en la tabla 4.9.

	8	9	10
19	Velocidad en X	Velocidad en Y	Velocidad en Z
20	0	0	-2

Tabla 4.9 Parámetros que definen la velocidad inicial de la esfera

Hay que tener en cuenta que hay que introducir la velocidad de la esfera en el eje Z con signo contrario al de la traslación en ese mismo eje para que exista contacto con la tela de araña.

El script impone como condición inicial en el primer step la velocidad inicial que ha sido introducida. En el siguiente step (step2) se desactiva dicha condición, permitiendo así que la tela de araña pueda parar a la esfera. En este step también se crean apoyos bloqueando los desplazamientos en los tres ejes de los extremos de los hilos de suspensión (figura 4.23 y 4.24).

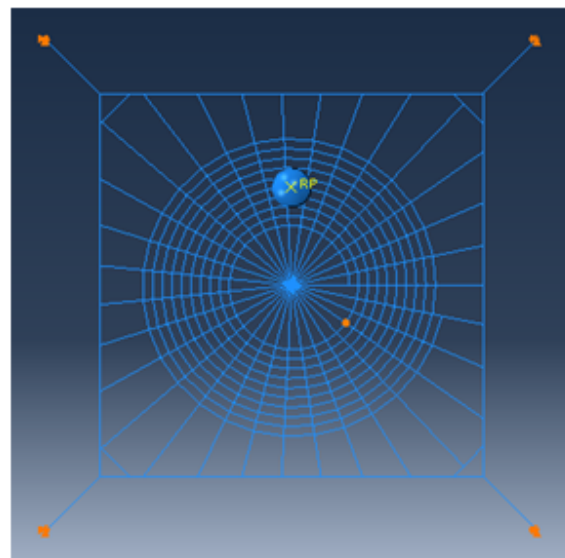
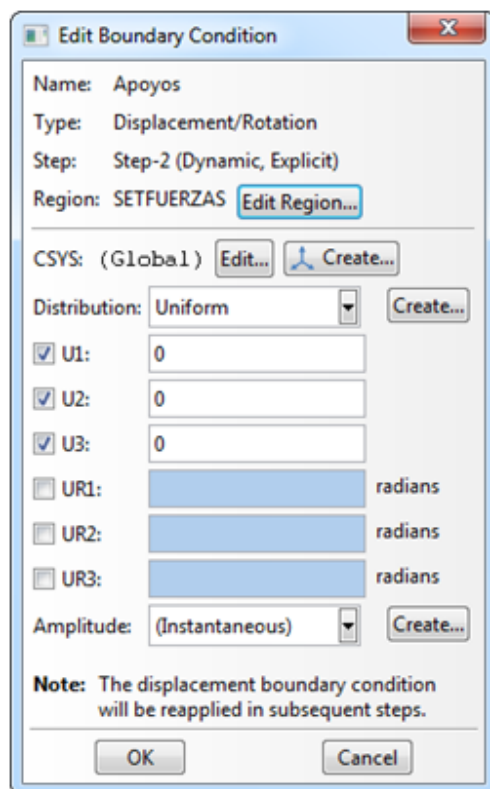


Fig. 4.23 Creación de los apoyos en los extremos de los hilos de suspensión

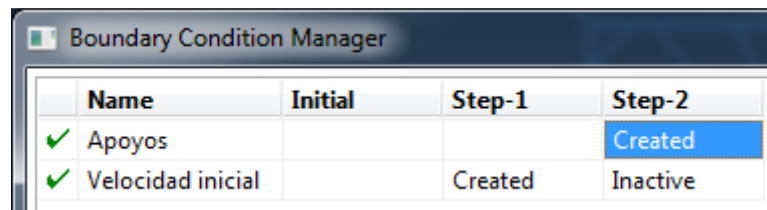


Fig. 4.24 Condiciones iniciales del modelo

Como se ha mencionado anteriormente, en caso de querer un modelo de tela de araña con pretensión en sus hilos (parámetro pretensión=1) se creará un step adicional. Variando el tiempo de este step (que ahora será el step1) y los parámetros “Eje X” y “Eje Y” que son los que determinan la velocidad de los extremos de los hilos de suspensión, se conseguirá un mayor o menor nivel de pretensión. (Tabla 4.10)

	8	9	10
	Pretensión	Eje X	Eje Y
25	1	10	10

Tabla 4.10 Parámetros que definen el nivel de pretensión de los hilos

4.5 Análisis de sensibilidad

Antes de lanzar las simulaciones, hay que hacer un estudio sobre la sensibilidad de los resultados al tamaño de elemento utilizado en el mallado del modelo. Cuanto menor sea dicho tamaño, mayor será la exactitud de los resultados.

Para este análisis, se han realizado 10 simulaciones con diferentes tamaños de elemento, presentados en la tabla 4.11.

Tamaño del elemento de mallado (mm)	40	20	10	5	3	2,79	1,67	1,19	0,93	0,43
Número de elementos en el tramo más pequeño de hilo	1	1	1	1	1	2	3	4	5	10

Tabla 4.11 Tamaño del elemento de mallado y número de elementos que componen el tramo más pequeño de hilo en los modelos propuestos para el análisis

Para comparar los resultados de los modelos anteriormente propuestos, se ha calculado para cada instante de tiempo la variación en el desplazamiento del insecto en el eje Z (perpendicular a la tela de araña) entre cada modelo y el de referencia (tamaño de mallado 0.00043 m). El promedio de las diferencias entre los desplazamientos para los distintos modelos se presentan en la figura 4.25.

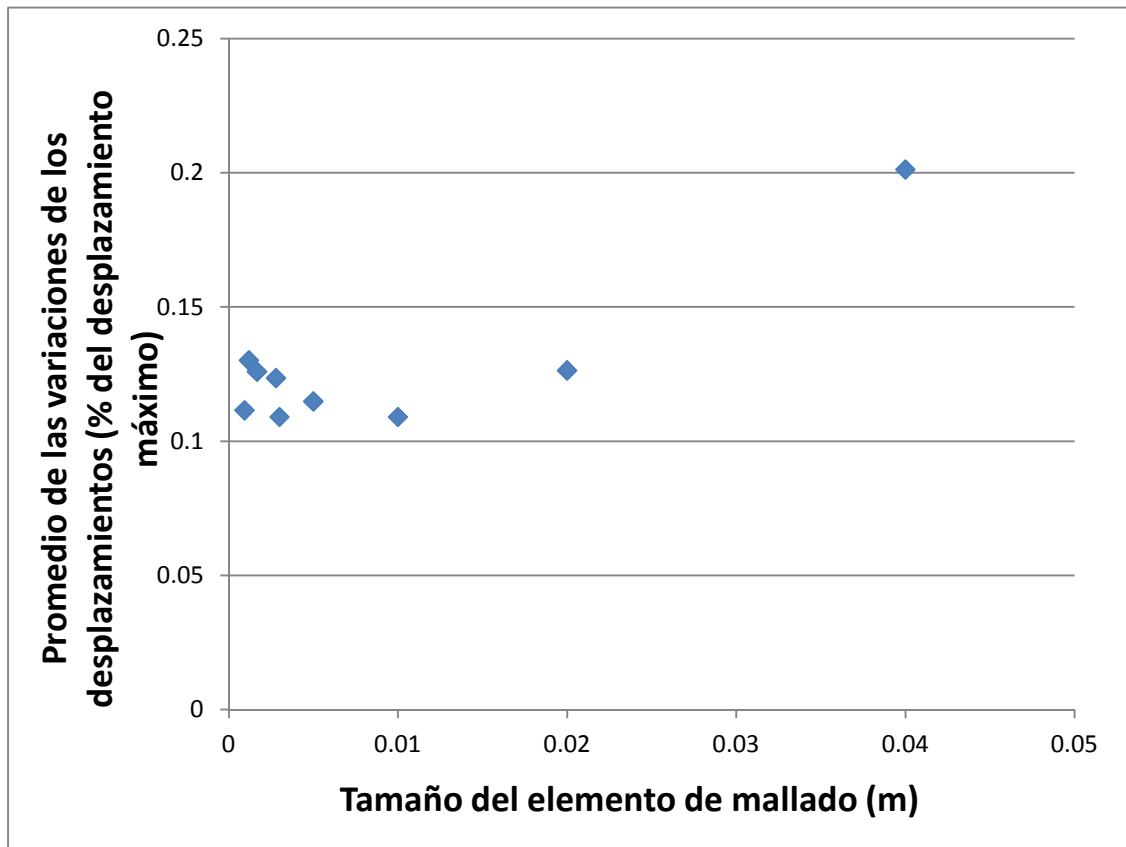


Fig. 4.25 Promedio de las variaciones de los desplazamientos entre cada modelo y el de referencia en función del tamaño del elemento de mallado

Se puede ver que a partir de un elemento de mallado de 0,02 m no hay una mejora en los resultados obtenidos. Cuanto menor sea su tamaño mayor va a ser el tiempo de ejecución de las simulaciones, por lo que habrá que encontrar un equilibrio entre ambos.

Hay otro aspecto a tener en cuenta, y es que la subrutina del profesor Zaera asigna en alguna ocasión tensiones negativas a ciertos hilos de la tela de araña, y esto hará que algunos elementos trabajen a compresión. Los valores de estas tensiones son bajos comparados con las de tracción, pero no pueden obviarse. Esto se puede minimizar mallando con varios elementos los tramos más pequeños de la tela.

Finalmente, en todas las simulaciones que se realizarán se usará un mallado a base de elementos de 0,00167 m de longitud, de tal manera que los tramos de hilo más

pequeños estén compuestos por 3 elementos. De esta manera, será bastante improbable que se alineen provocando tensiones de compresión.

5 Análisis de resultados

5.1 Influencia de la fuerza aerodinámica

Para analizar el efecto que produce la fuerza de Drag sobre la tela de araña se van a hacer diversas simulaciones variando tres parámetros: la velocidad de impacto, la masa del insecto y la presencia de la fuerza aerodinámica. Los distintos valores que pueden tomar dichos parámetros se presentan en la tabla 5.1.

Fuerza de Drag	ON		OFF	
Masa (mg)	15		30	
Velocidad (m/s)	1	2	3	4

Tabla 5.1 Diferentes parámetros para la realización de las simulaciones

Realizando todas las combinaciones posibles se obtiene un total de 16 simulaciones.

La geometría de la tela de araña y la posición inicial de la esfera son las que se usaran como referencia en muchos de los casos de este proyecto, con los datos para la hoja de Excel de la tabla 5.2. En la figura 5.1 puede verse como queda la tela de araña estudiada.

Nº de Radios	Marco Secundario	Long. Hilos Susp.	
24	1	0.04	
Longitud tramo 1	Longitud tramo 2	Longitud tramo 3	Principio de la espiral
0.01	0	0	0.02
Paso espiral zona 1	Paso espiral zona 2	Paso espiral zona 3	
0.0035	0.01	0.01	
	Lado	Ángulo Marco S.	
	0.2	0.7	

Traslación en X	Traslación en Y	Traslación en Z
0	0.05	0.012

Tabla 5.2 Parámetros para definir la geometría de la tela de araña y la posición inicial del insecto

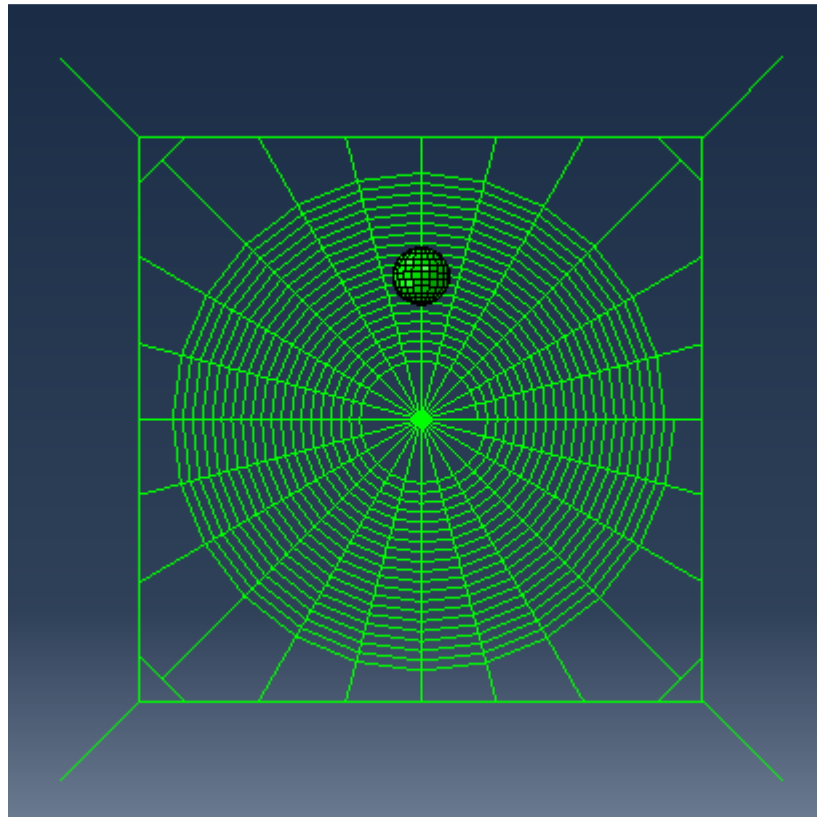


Fig. 5.1 Geometría de la tela de araña de referencia y posición inicial del insecto

Las variables que tendrán interés para analizar los resultados y por lo tanto serán comparadas son:

- La energía disipada por deformación plástica: Da una idea general sobre el nivel de deformación plástica alcanzado por la tela, representativa de la degradación sufrida. La esfera, al ser un sólido analítico rígido, no se deforma y por lo tanto no contribuye a esta variable.
- La energía disipada por rozamiento aerodinámico: La única fuerza externa que va a realizar un trabajo sobre el modelo va a ser la fuerza de Drag. Con esta variable se puede cuantificar este trabajo.

Como las simulaciones están hechas con esferas de diferente masa y velocidad, la energía cinética inicial no es siempre la misma. Para poder comparar los resultados, las variables de salida de energía disipada se dan como porcentaje de la energía inicial.

En este apartado, modo ON se refiere a que la fuerza de Drag está presente en el modelo, y modo OFF a que no lo está.

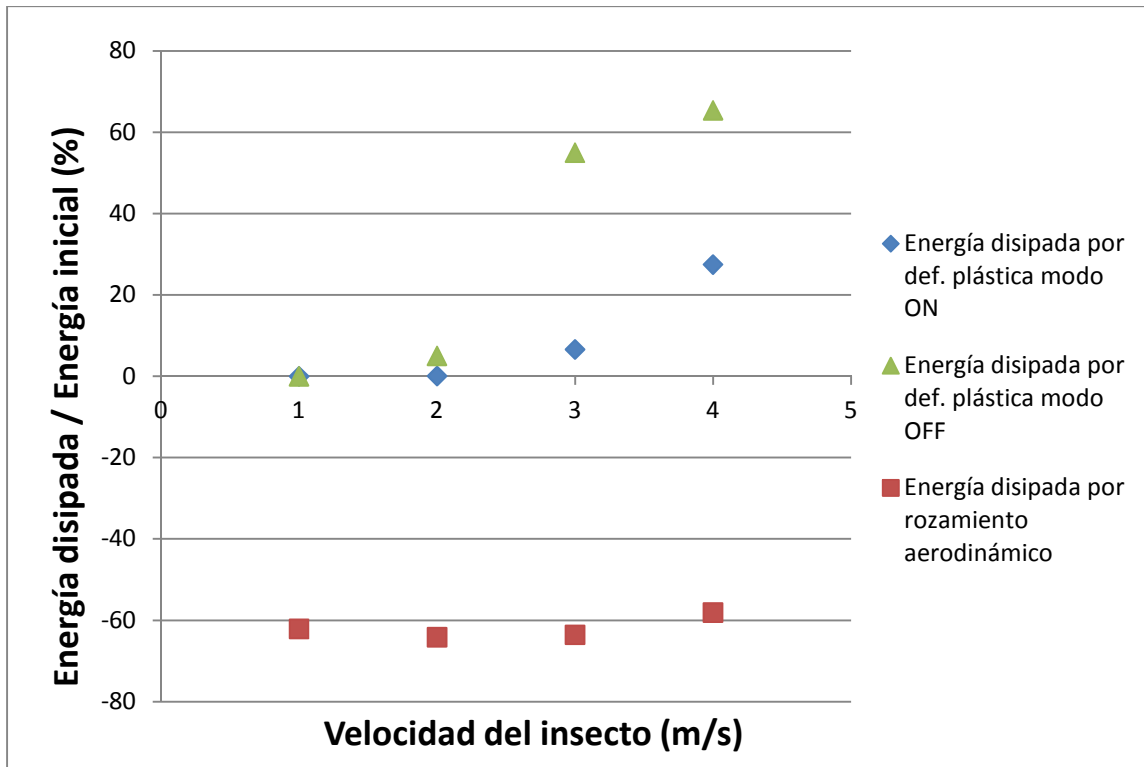


Fig. 5.2 Porcentaje de la energía disipada por deformación plástica y por efecto aerodinámico para un insecto de masa 15 mg

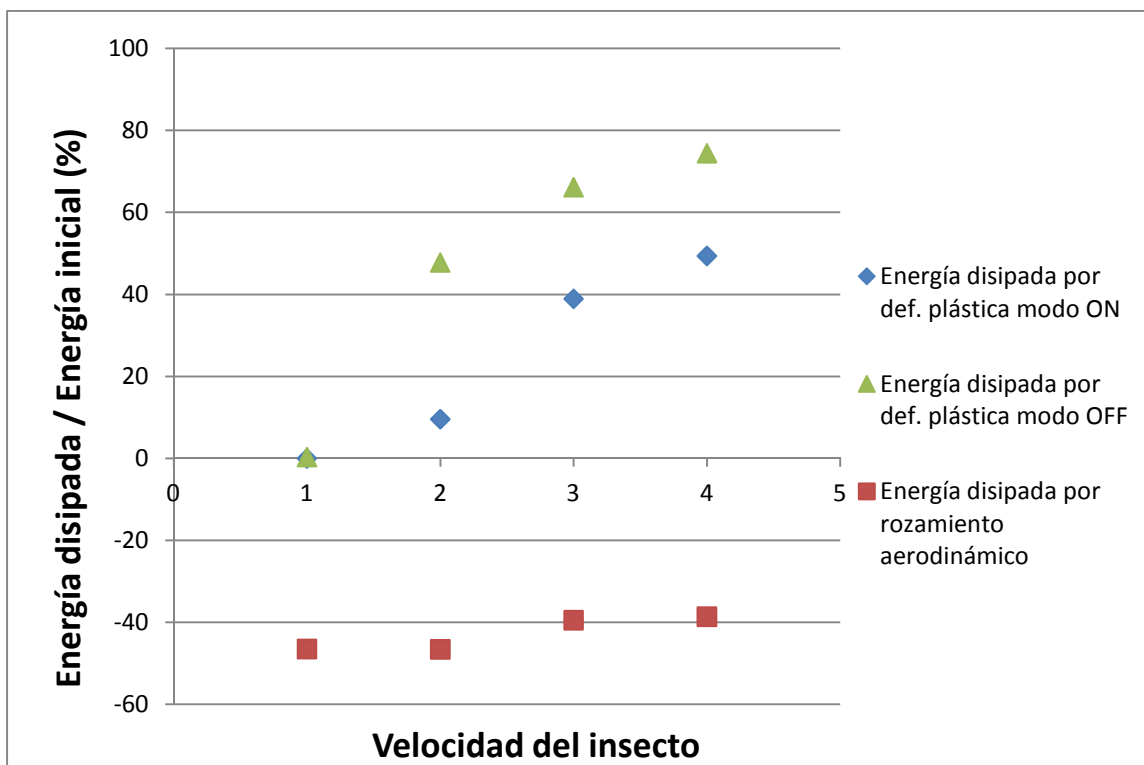


Fig. 5.3 Porcentaje de la energía disipada por deformación plástica y por efecto aerodinámico para un insecto de masa 30 mg

A la vista de los resultados presentados en las figuras 5.2 y 5.3, se puede decir que el porcentaje de la energía cinética inicial del insecto disipada debido a la fuerza de Drag es independientemente de la velocidad de impacto para una masa de insecto dada, y disminuye al aumentar dicha masa.

Hay una diferencia clara entre los valores de energía disipada por deformación plástica cuando la fuerza aerodinámica está o no presente. En el caso más extremo, el porcentaje con respecto a la energía inicial pasa del 6.6% (cuando la fuerza de Drag está presente) al 55% (cuando no lo está).

Se puede entonces afirmar que la fuerza de Drag juega un papel muy importante a la hora del impacto, ya que sin ella la degradación de la tela de araña aumentaría drásticamente.

5.2 Influencia de las propiedades mecánicas de los hilos en régimen dinámico

Como ya se ha indicado anteriormente, algunas propiedades mecánicas de los hilos varían con la velocidad de deformación de los mismos. En algunos artículos de la bibliografía se señala que este efecto podría ser beneficioso para el conjunto de la tela, pero sin afirmarlo rotundamente. En este apartado, al igual que en el anterior, se harán distintas simulaciones variando tres parámetros: la velocidad de impacto, la masa del insecto y el régimen de las propiedades mecánicas de los hilos. Los distintos valores que pueden tomar dichos parámetros se encuentran en la tabla 5.3.

Efecto de la velocidad de deformación	ON		OFF	
Velocidad (m/s)	1	2	3	4
Masa (mg)	15		30	50

Tabla 5.3 Parámetros para la realización de las simulaciones

De la misma manera que se hizo en el apartado anterior, modo ON se refiere a que se tiene en cuenta la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas de los hilos, y modo OFF que no.

Inicialmente se va a comparar la energía disipada por deformación plástica como porcentaje de la energía inicial del insecto en las distintas simulaciones (figura 5.4).

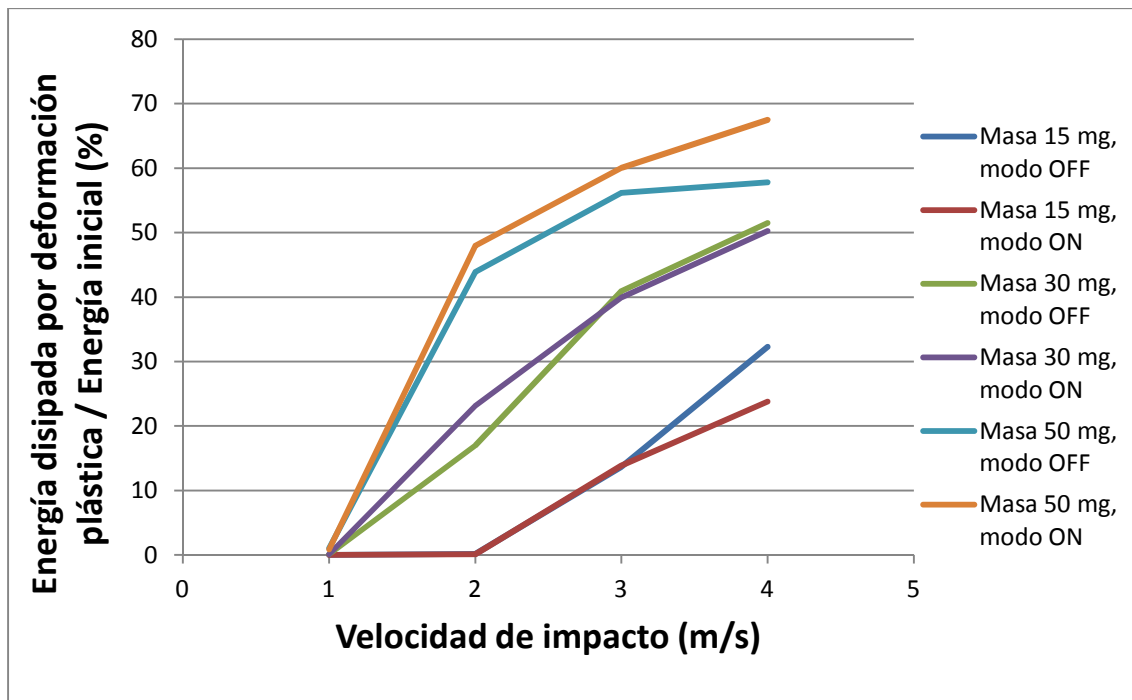


Fig. 5.4 Energía disipada por deformación plástica en función de la velocidad de impacto para distintos insectos, con el efecto de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas ON y OFF

Analizando las gráficas anteriores, no se ve una diferencia notable en la energía disipada por deformación plástica entre los modelos con y sin efecto de la velocidad de deformación en comportamiento mecánico.

Como las tensiones alcanzadas durante el impacto son mayores si se considera el efecto de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas de los hilos, también lo será la energía disipada por deformación plástica. Por lo tanto será más interesante comparar directamente las deformaciones permanentes, presentadas en las figuras 5.5, 5.6 y 5.7.

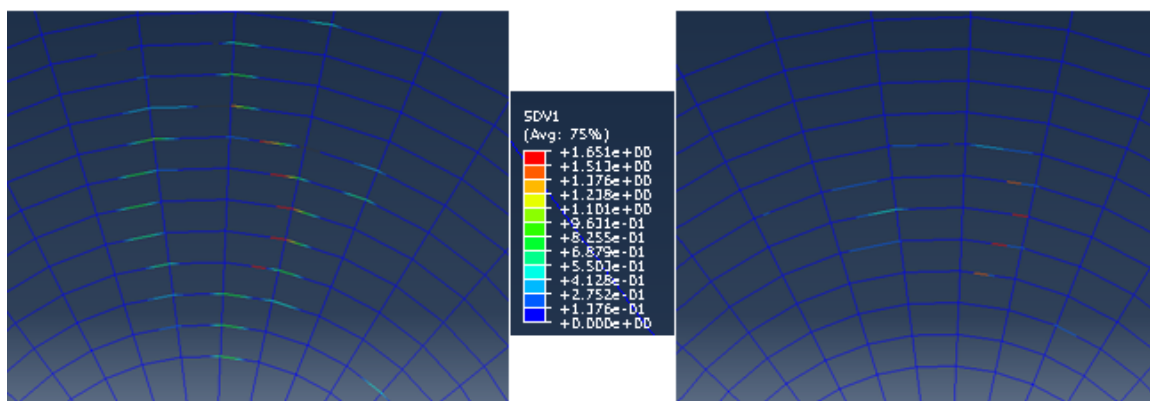


Fig. 5.5 Deformación permanente para la simulación correspondiente a una masa de 50 mg y 3 m/s en modo OFF (izquierda) y ON (derecha)

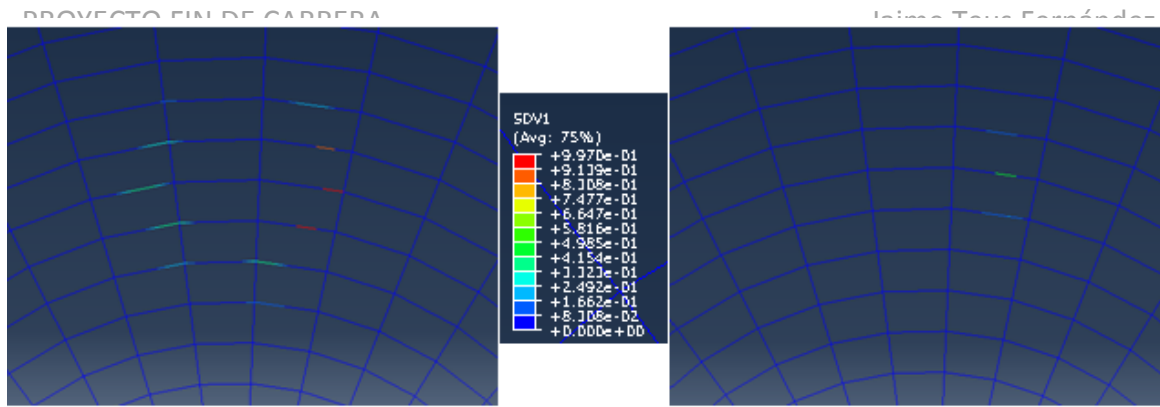


Fig. 5.6 Deformación permanente para la simulación correspondiente a una masa de 30 mg y 2 m/s en modo OFF (izquierda) y ON (derecha)

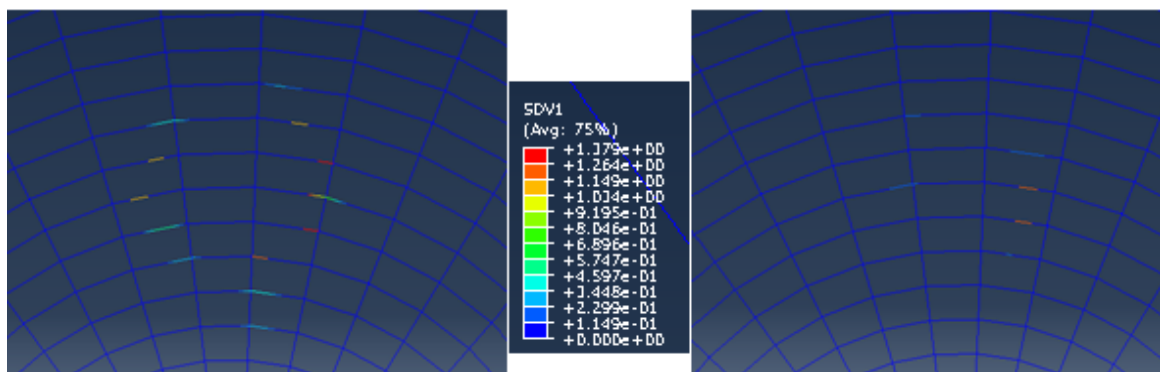


Fig. 5.7 Deformación permanente para la simulación correspondiente a una masa de 15 mg y 4 m/s en modo OFF (izquierda) y ON (derecha)

Solo se han presentado los mapas de deformaciones plásticas de 6 de las 24 simulaciones, ya que la tendencia es la misma en todas ellas. Se puede ver claramente que las deformaciones permanentes son mayores y afectan a más tramos de hilo cuando las propiedades mecánicas se consideran en régimen estático, lo cual nos indica que la tela de araña sufre más daños.

También sería interesante ver cómo se ve afectado el desplazamiento y la velocidad del insecto una vez que entra en contacto con la tela. En las figuras 5.8 y 5.9 se representan dichas variables en el eje correspondiente al movimiento de la esfera para las simulaciones de masa 30 mg y velocidad 2 y 4 m/s, con la influencia de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas en modo ON y modo OFF.

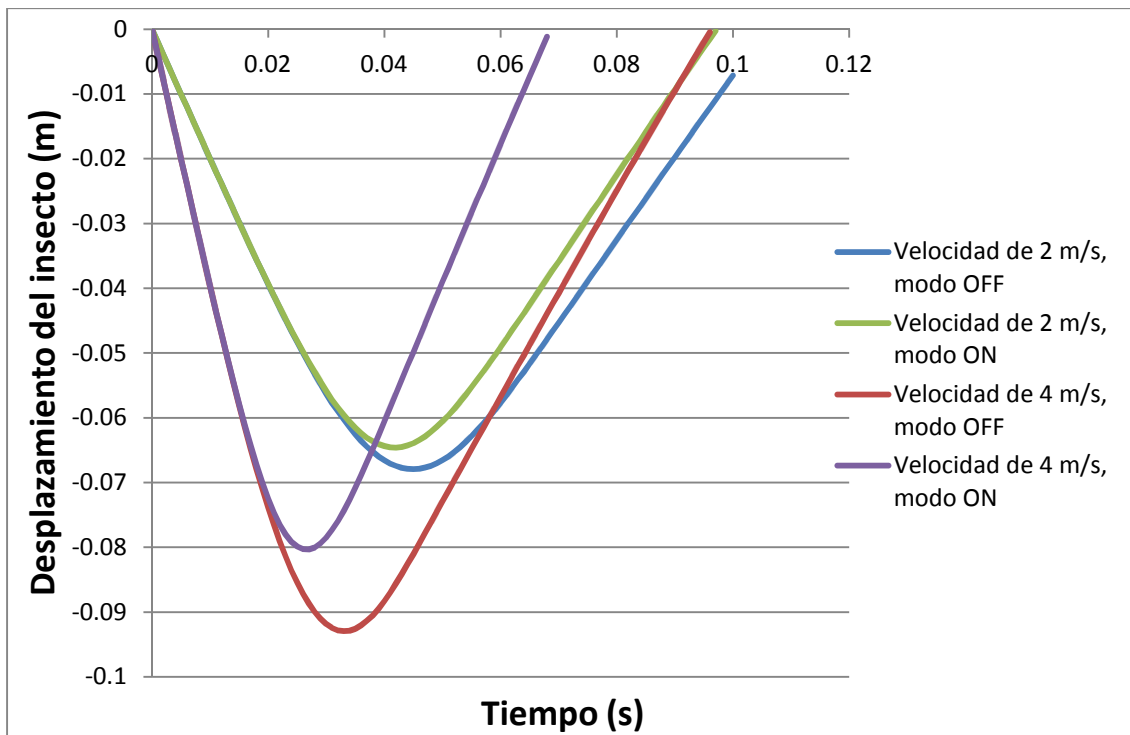


Fig. 5.8 Desplazamiento del insecto frente al tiempo para dos velocidades de impacto, considerando régimen estático o dinámico para las propiedades mecánicas

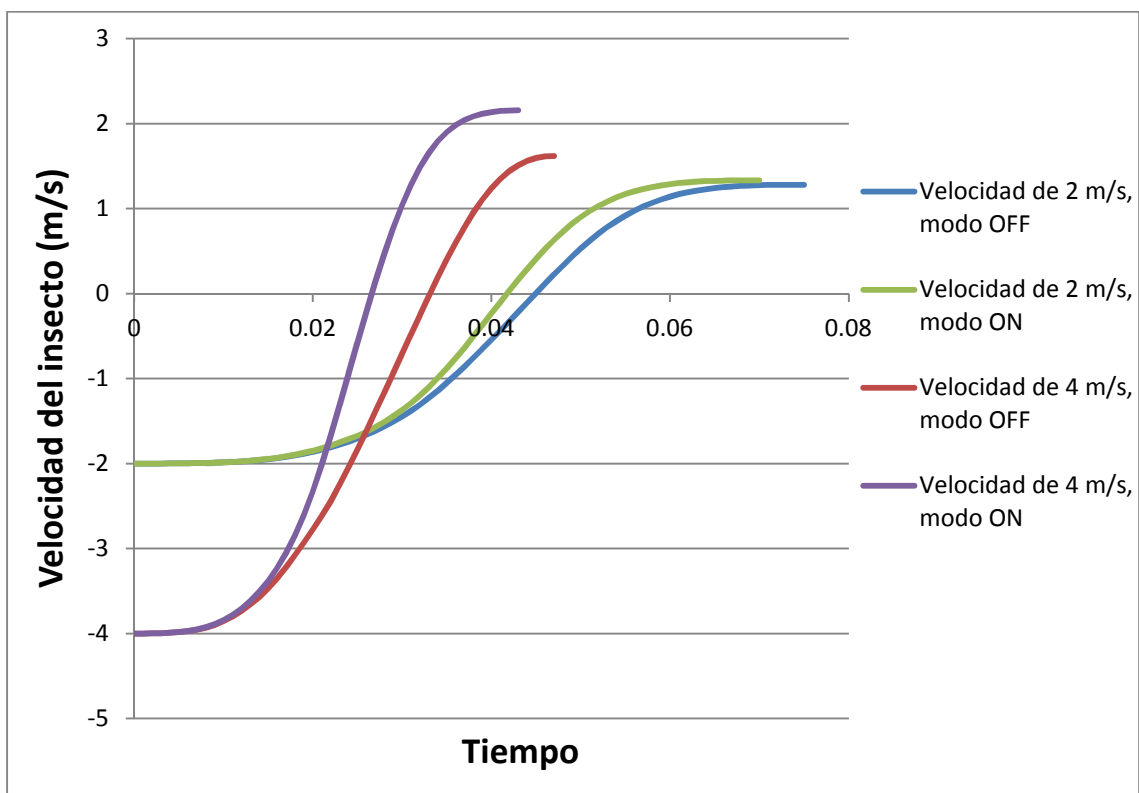


Fig. 5.9 Velocidad del insecto frente al tiempo para dos velocidades de impacto, considerando régimen estático o dinámico para las propiedades mecánicas

Se han representado las velocidades hasta el momento en el que éstas son constantes de nuevo, y los desplazamientos hasta el momento en el que el insecto pasa por el plano que define la tela de araña en reposo.

Analizando las gráficas de las figuras 5.8 y 5.9, se puede concluir que los desplazamientos máximos que alcanzan los insectos al impactar con una tela de araña son menores si se consideran las propiedades mecánicas en régimen dinámico que en régimen estático. También es menor el tiempo que tarda en alcanzar dicho desplazamiento.

Aunque los valores obtenidos en estas simulaciones puedan no ajustarse con mucha precisión a la realidad, el único fin era demostrar que el efecto que tiene la velocidad de deformación sobre las propiedades mecánicas de los hilos es beneficioso para la tela de araña. Al resultar una menor deformación permanente en el conjunto, el efecto es claramente beneficioso.

5.3 Influencia de la pretensión en los hilos

Varios autores que estudian la mecánica de la tela mencionan en sus artículos la pretensión aplicada por la araña a los hilos. No se ha encontrado información sobre el beneficio que esto puede suponer en la respuesta de la tela ante un impacto, por lo que se van hacer varias simulaciones considerando un modelo con varios niveles de pretensión. Estos niveles se presentan en la tabla 5.4.

Modelo	Tipo de hilo		
	Suspensión	Marco	Radial
Sin pretensión	0	0	0
Pretensión 1	72	50	1.8
Pretensión 2	99	68	3

Tabla 5.4 Tensión inicial (en MPa) en los distintos tipos de hilo para cada modelo estudiado

Los datos de pretensión del modelo “Pretensión 1” se han intentado ajustar a los obtenidos de la bibliografía, expuestos en la tabla 2.6. Es muy complicado obtener valores exactos, ya que se condicionan entre sí.

Lo primero que va a ser analizado es el daño permanente provocado por el impacto de insecto, mediante la comparación de la energía disipada por deformación plástica en los distintos modelos. Los datos obtenidos se muestran en la figura 5.10.

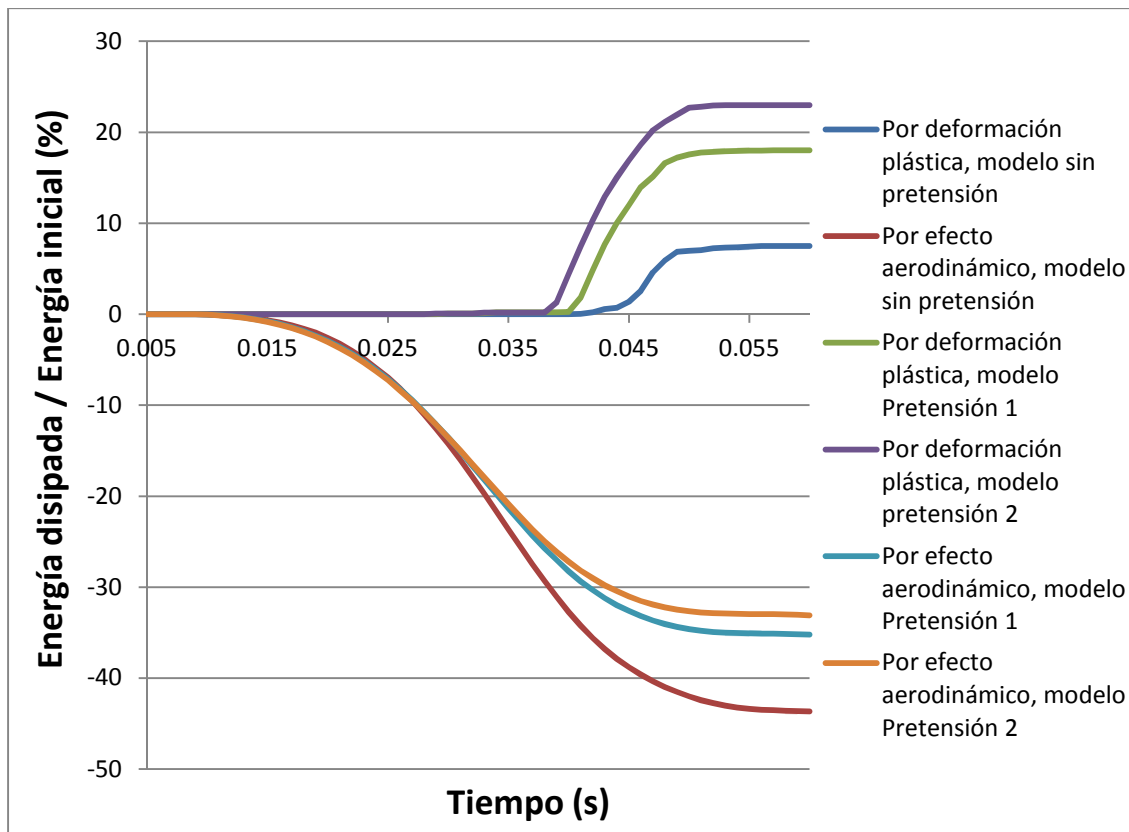


Fig. 5.10 Energía disipada por deformación plástica y por efecto aerodinámico en los tres modelos estudiados

La energía disipada por deformación plástica aumenta cuando la tensión inicial en los hilos de la tela aumenta. En cambio, la energía disipada por rozamiento aerodinámico disminuye. Estos resultados tienen relación entre sí, ya que como se ha visto anteriormente la fuerza de Drag favorece a la tela de araña a la hora de absorber la energía del impacto de un insecto.

La pretensión también va a afectar a otros aspectos de la respuesta de la tela, como por ejemplo el desplazamiento y la velocidad del insecto una vez que los dos cuerpos han entrado en contacto. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5.11 y 5.12.

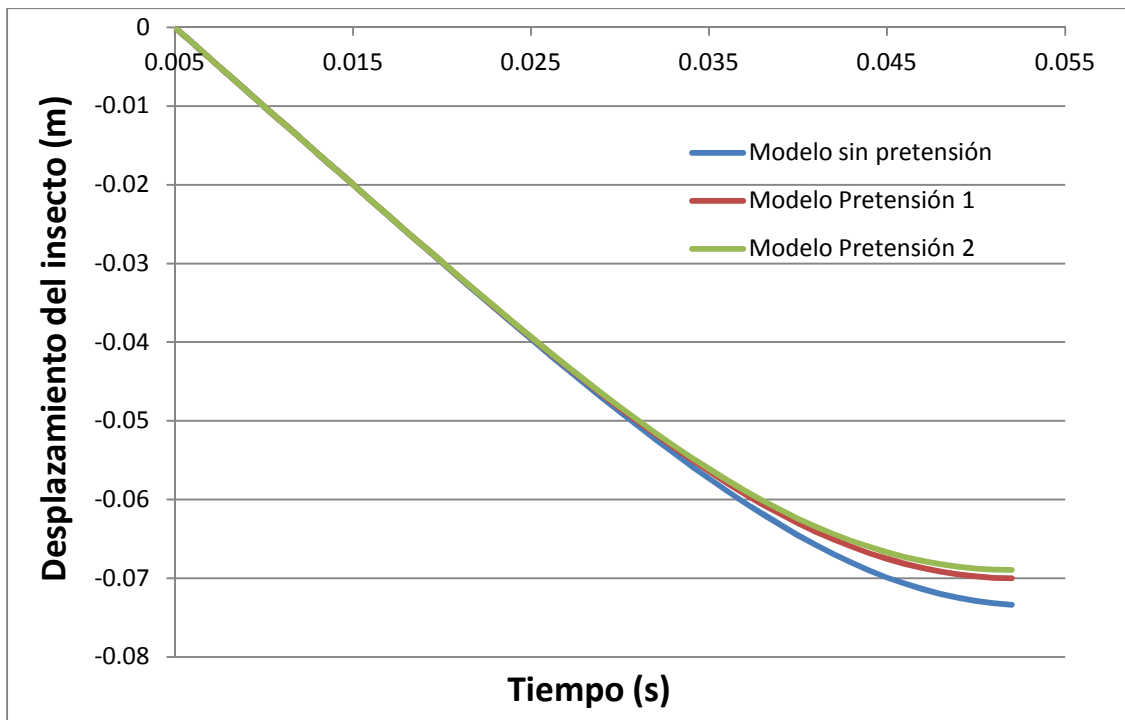


Fig. 5.11 Desplazamiento del insecto en los tres modelos estudiados

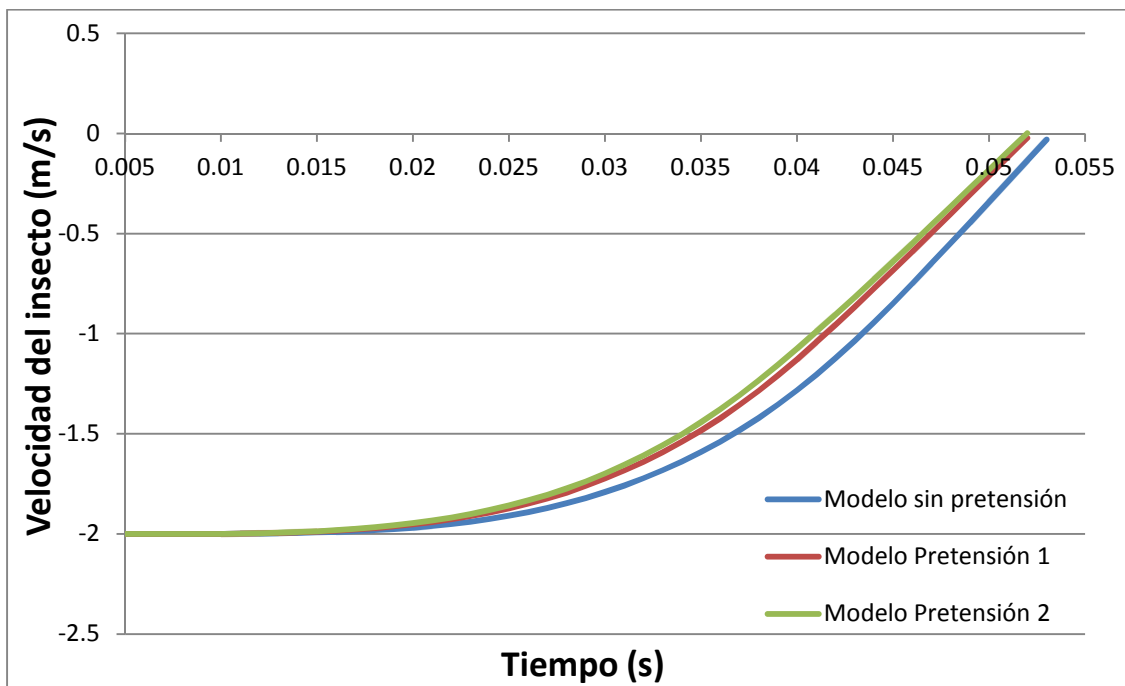


Fig. 5.12 Velocidad del insecto en los tres modelos estudiados

El desplazamiento máximo del insecto una vez que ha impactado en la tela de araña disminuye al aumentar la pretensión. Por lo tanto, como se puede confirmar analizando la segunda gráfica, el tiempo que tarda la tela en detener por primera vez al insecto también disminuye. Estos resultados tienen relación con los obtenidos

anteriormente ya que al tener el conjunto de la tela un movimiento menor, el rozamiento aerodinámico afectará en menor medida.

Con estas simulaciones no se puede confirmar que la pretensión de los hilos tenga un efecto positivo sobre la tela.

Hay que analizar estos resultados con mucha precaución debido a la dificultad de ajustar el valor de la tensión inicial en los hilos. Como ya se comentó al principio de este apartado, uno puede elegir el valor de la pretensión en una región de la tela y automáticamente quedarán definidos el resto. Por ejemplo, en el modelo “Pretensión 1” los valores se han intentado ajustar a los encontrados en la bibliografía, y se pueden ver las diferencias en la siguiente tabla:

		Modelo	
		Pretensión 1	Lin & Sobek, 1998
Tipo de hilo	Radial	1,8	13,7
	Marco	50	47,1
	Suspensión	72	67,2

Tabla 5.5 Diferencias entre la tensión inicial en los distintos hilos en el modelo "Pretensión 1" y en el de Lin y Sobek (1998)

Los valores de pretensión en los hilos del marco y de suspensión son muy parecidos en los dos modelos, pero existe una gran diferencia en el de los hilos radiales.

5.4 Intercambio de propiedades entre los hilos espirales y radiales

Los hilos radiales y espirales tienen propiedades mecánicas muy diferentes. Merece la pena recordar las curvas de tensión – deformación que fueron definidas a partir de los datos encontrados en la bibliografía, presentadas en la figura 5.13.

También es diferente el diámetro de los hilos, pasando de 2.3 μm para los hilos espirales a 3.5 μm para los radiales.

Es de suponer que estas propiedades, fruto de una larga evolución, tienen algún sentido en el punto de vista estructural. En los dos siguientes apartados se va a analizar este aspecto, intercambiando propiedades entre los dos tipos de hilo para ver la respuesta de la tela ante el impacto de un insecto.

Las simulaciones que se van a hacer son:

- Modelo de referencia con propiedades mecánicas de los materiales y diámetros originales
- Modelo con las propiedades mecánicas de los materiales intercambiadas y manteniendo los diámetros originales
- Modelo con los diámetros intercambiados y con las propiedades mecánicas de los materiales originales

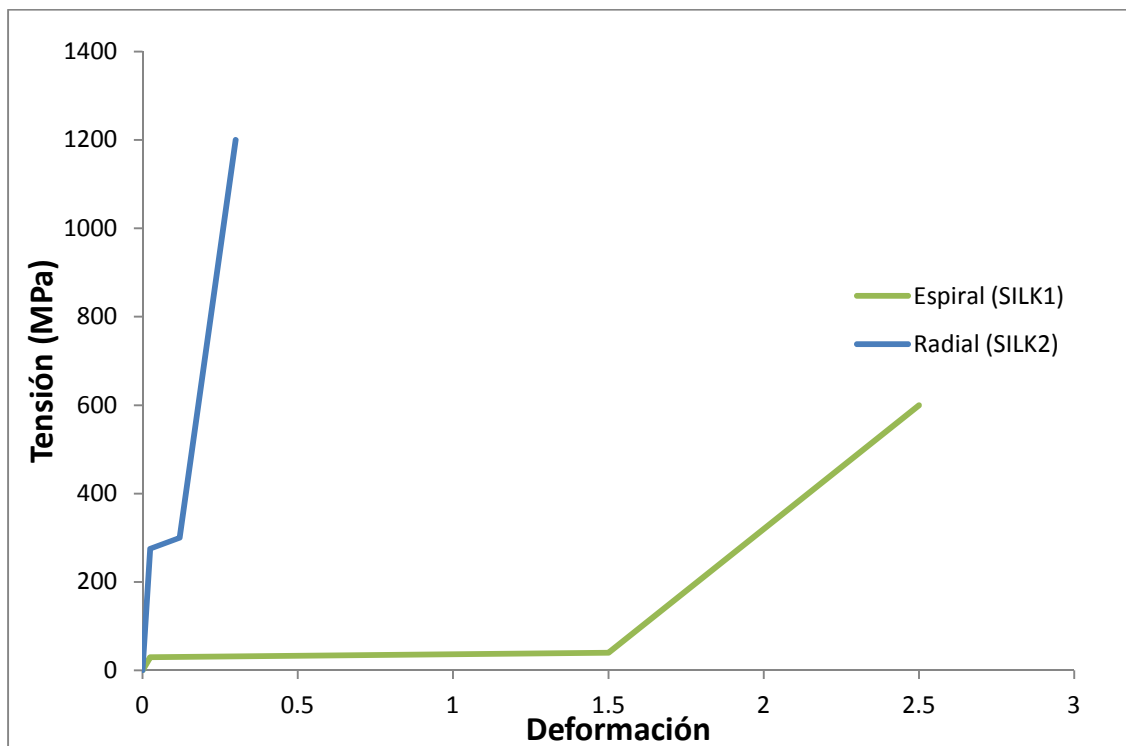


Fig. 5.13 Curvas tensión - deformación de los hilos radiales y espirales

La geometría de la tela de araña que va a ser utilizada en estas simulaciones tiene una peculiaridad, y es que la longitud total de hilo radial es la misma que la de hilo espiral (ver figura 5.14). De esta manera, cuando se modifiquen las propiedades mecánicas de los materiales o el diámetro de los hilos, el volumen total de hilo tejido no variará (ya que la densidad es la misma para todos los hilos). Se considera que el volumen de hilo es un indicador de la energía que necesita una araña para tejer una tela, y por lo tanto dicho coste energético será el mismo para las tres simulaciones.

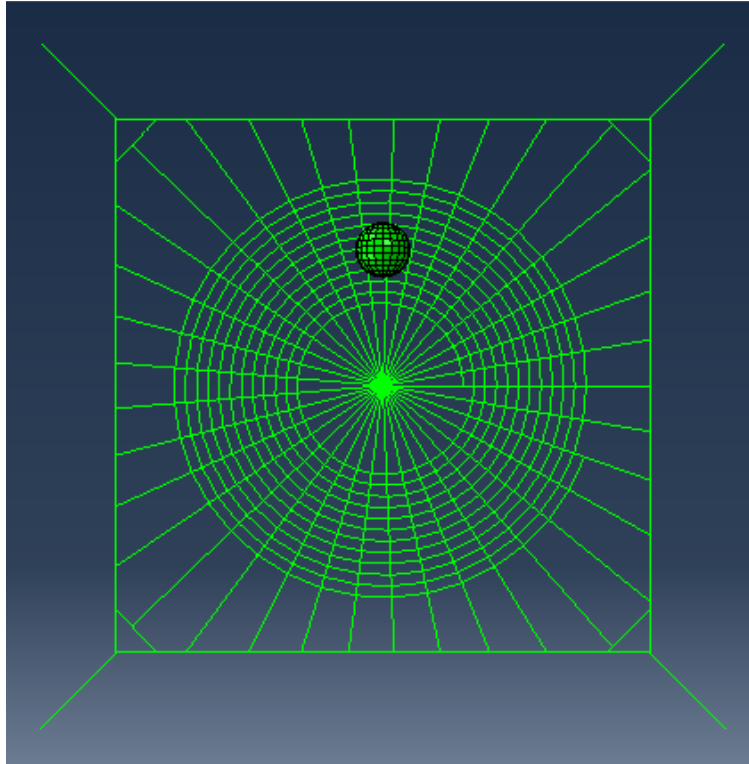


Fig. 5.14 Geometría de la tela de araña con longitud total de hilo radial igual a la espiral

5.4.1 Intercambio de propiedades mecánicas

Lo primero que se analizará es la energía disipada por deformación plástica y por el efecto de la fuerza aerodinámica. Como ya se hizo en el caso anterior, estas energías se dan como porcentaje de la energía inicial. Los resultados se encuentran en la figura 5.15.

Como era de suponer, la energía disipada por la fuerza de Drag es muy similar en los dos casos. Esto es debido a que el rozamiento aerodinámico no es función de las propiedades mecánicas de los hilos, sino del diámetro y de la cantidad de los mismos.

Sin embargo la energía disipada por deformación plástica pasa de ser el 17% de la energía inicial en el caso de referencia a un 26% en el modelo con intercambio de propiedades, indicando esto que los daños sufridos por la tela son mayores (figura 5.15).

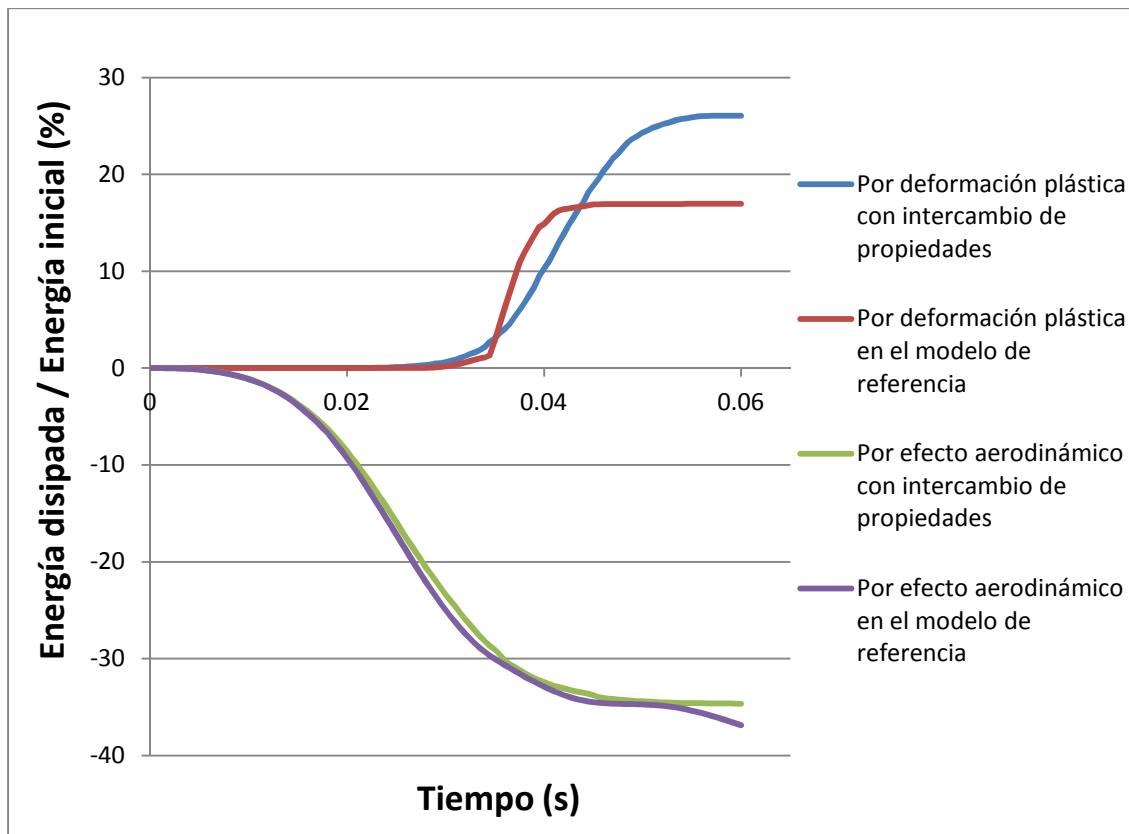


Fig. 5.15 Energía disipada por deformación plástica y por efecto aerodinámico frente al tiempo en el modelo de referencia y en el de intercambio de propiedades

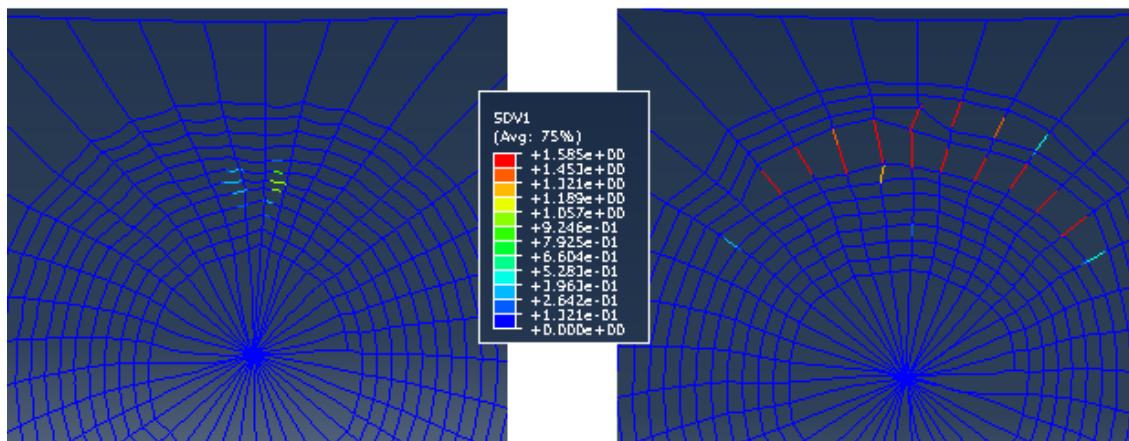


Fig. 5.16 Deformación plástica sufrida por los hilos en el modelo de referencia (izquierda) y en el modelo con intercambio de propiedades (derecha)

Se puede ver en la figura 5.16 que en el caso de referencia los hilos que sufren mayor deformación plástica son los de la espiral, llegando a 1 su valor. En el otro caso son los hilos radiales, y además se deforman un mayor número de ellos hasta el valor de 1.585. También se puede analizar el mapa de tensiones en la figura 5.17.

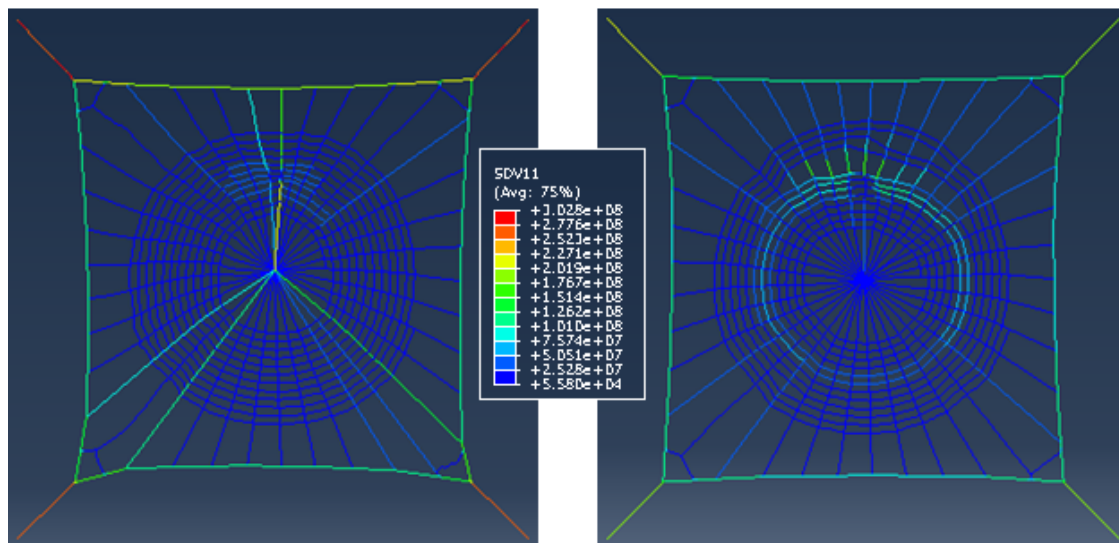


Fig. 5.17 Mapa de tensiones máximas alcanzadas en el modelo de referencia (izquierda) y en el modelo con intercambio de propiedades (derecha)

Como puede verse en el mapa de la izquierda, los hilos radiales transmiten gran parte de la tensión que sufren a los hilos del marco, y éstos a su vez lo hacen a los hilos de suspensión. De esta manera, los hilos más rígidos (radiales, del marco y de suspensión) absorben parte de la energía que reciben deformándose plásticamente.

Por lo contrario, si se intercambian las propiedades entre los hilos espirales y radiales, estos últimos pasarán a ser mucho menos rígidos. A causa de esta disminución drástica de rigidez, no serán capaces de transmitir tensión a los hilos del marco y se deformarán plásticamente.

Se puede por tanto concluir que aunque el coste energético de creación de la tela de araña sea el mismo en los dos casos, las propiedades mecánicas de los hilos están asignadas de tal manera que el conjunto sufra el menor daño posible cuando impacta un insecto.

5.4.2 Intercambio de diámetros

Se presenta de nuevo en la figura 5.18 la energía disipada por deformación plástica y por el efecto de la fuerza aerodinámica.

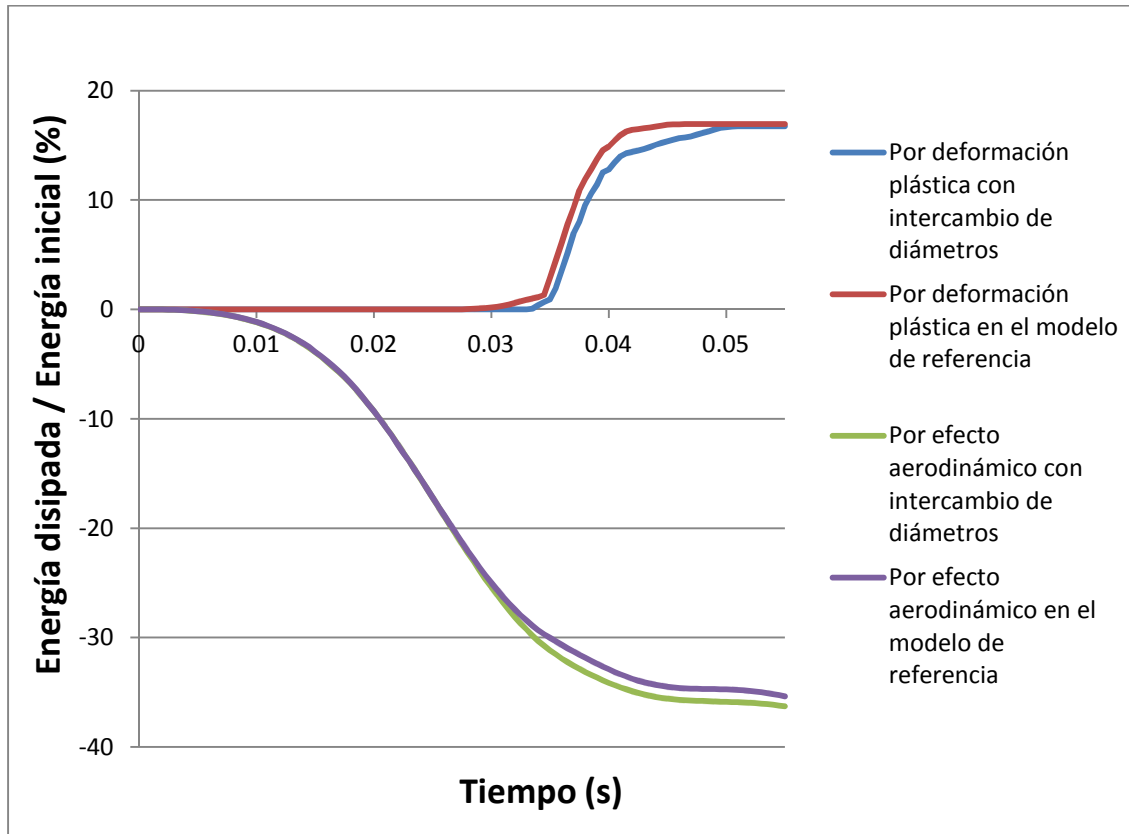


Fig. 5.18 Energía disipada por deformación plástica y por efecto aerodinámico frente al tiempo en el modelo de referencia y en el de intercambio de diámetros

A primera vista no se ven grandes diferencias en la energía disipada por deformación plástica en las dos simulaciones propuestas, por lo que el daño permanente que sufre la tela de araña es muy similar. La energía disipada por efecto aerodinámico también es parecida, debido a que no ha sido variado el número de hilos ni la longitud total de los mismos.

En la figura 5.19 se estudiará de nuevo la energía disipada por deformación plástica, pero esta vez analizando la contribución de cada tipo de hilo de la tela.

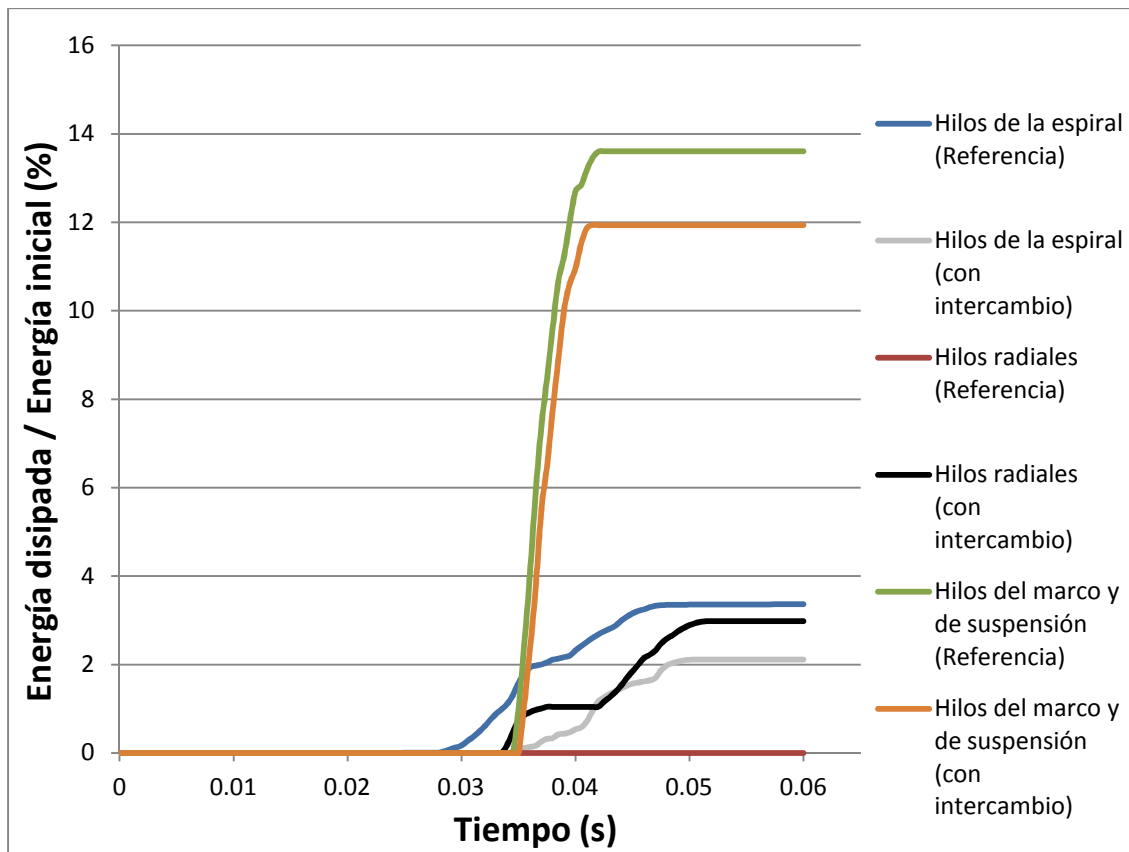


Fig. 5.19 Energía disipada por deformación plástica frente al tiempo en el modelo de referencia y en el de intercambio de diámetros para los distintos tipos de hilos

Como se puede ver en la figura 5.19, los hilos de la espiral disipan una mayor cantidad de energía por deformación plástica en el caso de referencia (3,4%) que en el caso con intercambio de diámetros (2,1%), justo al contrario que los radiales (que pasan de un 0% a un 3%). Esto era previsible, ya que la tensión varía con el cuadrado del inverso del diámetro. Al tensionarse más los hilos radiales, su deformación es mayor y la transmisión de tensión a los hilos del marco y de suspensión es menor (pasa de un 13,6% de la energía inicial a un 12%).

Por lo tanto, el hecho de que los hilos de la espiral tengan un menor diámetro que los radiales hace que la deformación se localice más en ellos. Esto podría ser debido a que en el caso de recibir más impactos, es posible que sea más beneficioso tener los hilos radiales que los espirales con el menor daño posible, para que puedan seguir transmitiendo tensión al resto de hilos.

5.5 Influencia del marco secundario

En muchos artículos científicos que tratan sobre la geometría de las telas de araña no se mencionan los hilos del marco secundario (ver figura 2.7).

Con las siguientes simulaciones se va a intentar comprender la función que tienen, analizando (como en los casos anteriores) la energía disipada por deformación plástica y por efecto aerodinámico.

Los parámetros que definen la geometría de la tela de araña que se van a variar son:

- La presencia o ausencia de los hilos del marco secundario
- El número de hilos radiales

En la siguiente tabla se recopila la información obtenida tras analizar los resultados de las simulaciones. Las energías disipadas se dan en el momento en el que la esfera tiene velocidad nula por primera vez, cuando las tensiones alcanzan sus valores máximos.

		Número de hilos radiales					
		16		24		48	
Energía disipada / Energía inicial (%)	Hilos del marco secundario	Si	No	Si	No	Si	No
	Por deformación plástica	43,2	54,6	44,2	53,4	41,7	48,1
	Por efecto aerodinámico	37,4	25,8	37,1	27,2	41	34,3

Tabla 5.6 Tabla resumen con las energías disipadas en los distintos modelos

La presencia de los hilos del marco secundario provoca un aumento notable en la energía disipada por efecto aerodinámico, lo que hace que disminuya la disipada por deformación plástica. Esta disminución es más notable conforme disminuye el número de hilos radiales del modelo. En las figuras 5.20, 5.21 y 5.22 se analizan los mapas de tensiones máximas alcanzadas durante la simulación.

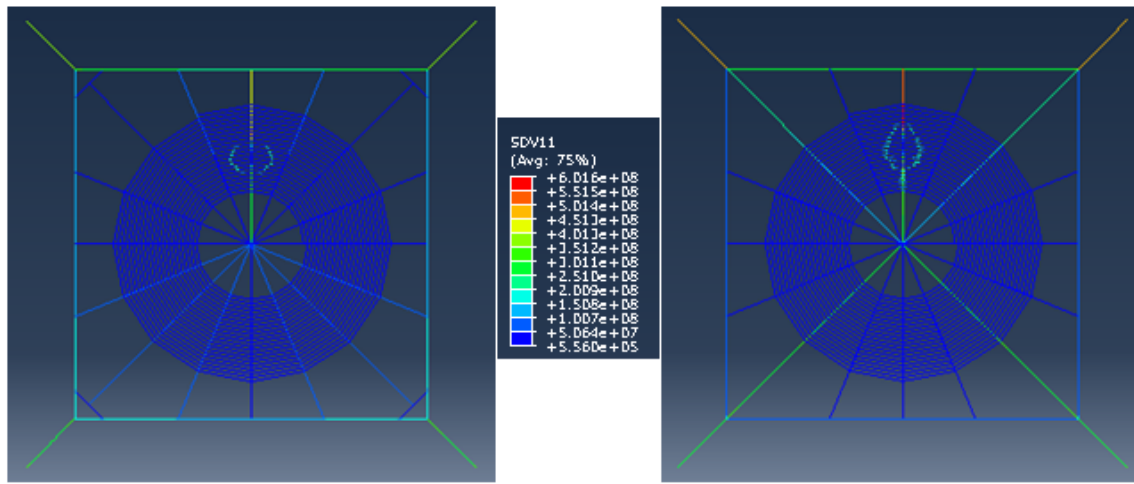


Fig. 5.20 Mapa de tensiones máximas alcanzadas en el modelo de 16 hilos radiales con y sin marco secundario

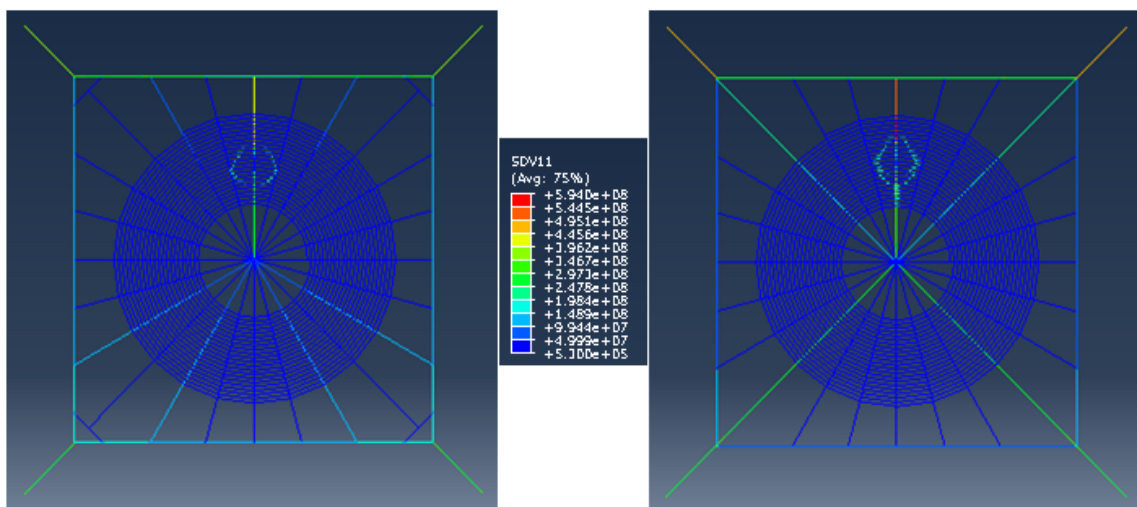


Fig. 5.21 Mapa de tensiones máximas alcanzadas en el modelo de 24 hilos radiales con y sin marco secundario

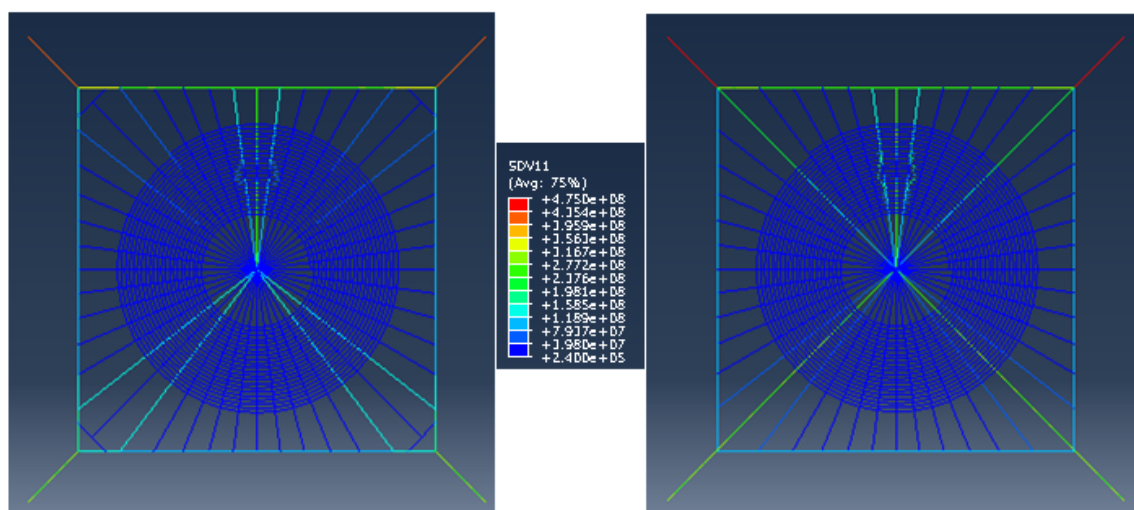


Fig. 5.22 Mapa de tensiones máximas alcanzadas en el modelo de 48 hilos radiales con y sin marco secundario

Como se puede ver en los mapas de tensiones anteriores, en los modelos en los que no hay hilos del marco secundario las tensiones que se alcanzan son algo mayores que en los modelos en los que sí están presentes. Además, al estar alineados ciertos hilos radiales con los de suspensión, gran parte de la tensión es transmitida por estos hilos. Esto hace que se vean sometidos a mucho esfuerzo, independientemente de la zona de impacto.

Simplemente añadiendo a la tela de araña los hilos del marco secundario, los cuatro hilos radiales críticos ya no van directamente unidos a los hilos de suspensión, y se consigue que la mayor parte de la tensión no se transmita a través de ellos sino que se haga a través de un mayor número de hilos radiales de los alrededores.

Para confirmar esto, se van a obtener las tensiones alcanzadas en los hilos radiales del primer modelo (16 hilos radiales) con y sin marco secundario (figura 5.23 y 5.24 respectivamente). No se representará la tensión en el hilo radial perteneciente a la zona de impacto, ya que en los dos casos serán tensiones altas con poco interés en este análisis.

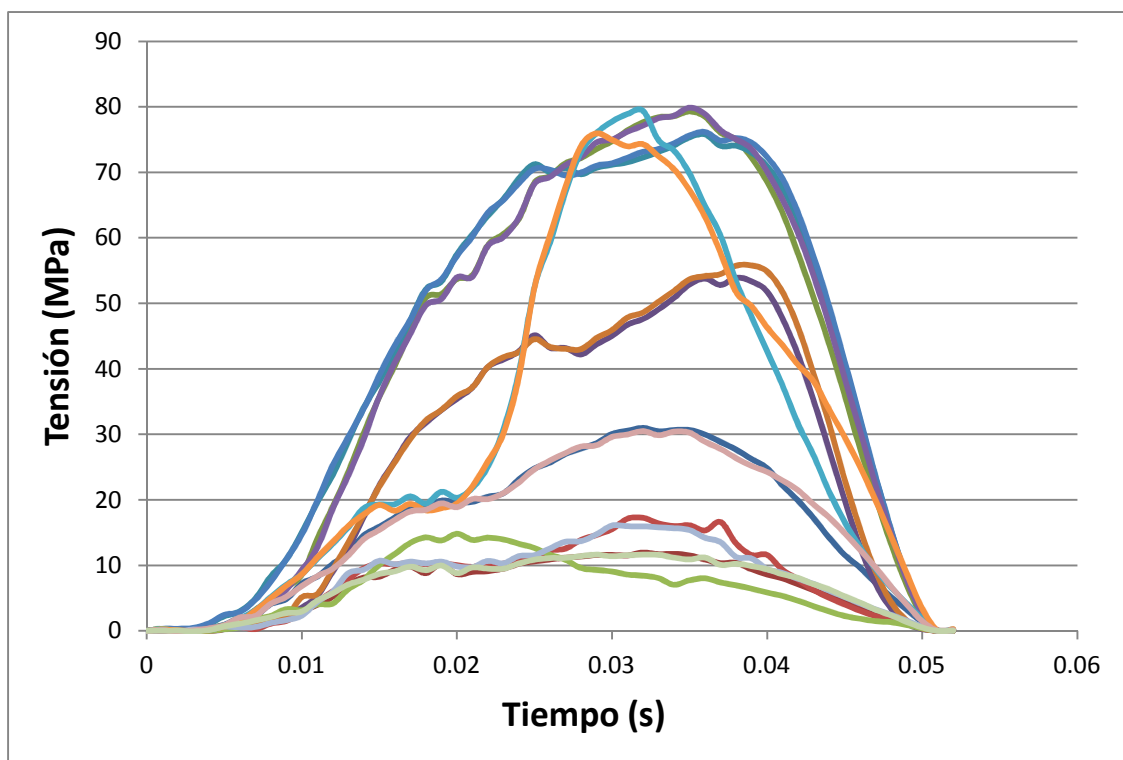


Fig. 5.23 Tensión en los hilos radiales frente al tiempo en el modelo con marco secundario

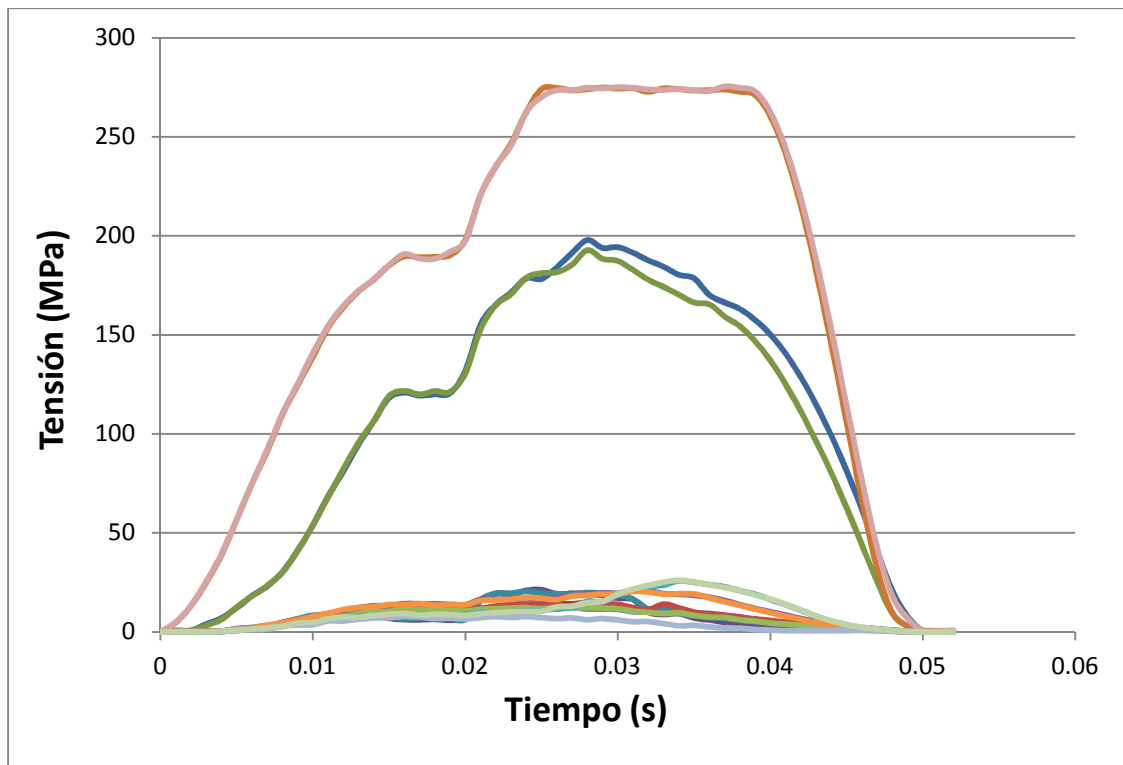


Fig. 5.24 Tensión en los hilos radiales a lo largo del tiempo en el modelo sin marco secundario

Se puede observar que en el modelo con marco secundario todos los hilos radiales tienen valores de tensiones en el mismo orden de magnitud, y que si este marco no existe hay cuatro hilos (los correspondientes a las diagonales) que sufren tensiones demasiado elevadas en comparación con el resto.

Por lo tanto se puede afirmar que los hilos del marco secundario tienen una importancia vital en el comportamiento mecánico de la tela de araña, ya que permiten que haya una homogeneización en el valor de las tensiones alcanzadas en los hilos radiales. De esta manera se consigue que el daño producido tras un impacto sea menor.

5.6 Influencia del número de hilos radiales y espirales

Sería interesante conocer el motivo por el cual la araña crea un mayor o menor número de hilos en las diferentes regiones de la tela. Seguramente exista un equilibrio entre ellos, pero no se ha podido encontrar mucha información en este aspecto en los artículos de la bibliografía.

Lo que se propone en este apartado es intentar encontrar dicho equilibrio, analizando diferentes modelos de tela de araña. Todos los modelos estudiados tienen el mismo volumen total de tela, por lo que supondremos que la araña gastará la misma cantidad de energía en su creación – aunque no en el movimiento necesario para su fabricación – y de esta manera los modelos podrán ser comparados en igualdad de condiciones. No se tendrá en cuenta la posible limitación fisiológica de la araña a la hora de crear hilos de mayor o menor diámetro.

Los únicos parámetros que se van a ir variando en la hoja de Excel para obtener las distintas geometrías son los correspondientes al número de hilos radiales presentes y el paso de la espiral, que se irán ajustando para obtener el mismo volumen total, que tiene un valor de $7,57 \times 10^{-11} \text{ m}^3$. De esta manera se analizará como afecta el aumento y disminución de la longitud total de los hilos de la espiral (en detrimento de los radiales) al comportamiento estructural de la tela.

Los distintos modelos estudiados se presentan en la tabla 5.7.

Número de hilos radiales	Paso de la espiral (m)	Longitud de hilo espiral (m)	Longitud de hilo radial (m)	Relación de masas Espiral/Radial
43	0.00674	2.57	4.8	0.23
41	0.00562	3.09	4.58	0.29
39	0.0048	3.6	4.35	0.36
37	0.0042	4.13	4.13	0.43
35	0.003735	4.64	3.91	0.51
33	0.003365	5.15	3.68	0.60
31	0.003057	5.67	3.46	0.71
27	0.002586	6.7	3.01	0.96
23	0.002235	7.74	2.57	1.30
19	0.00197	8.78	2.12	1.79
17	0.00186	9.29	1.9	2.11
15	0.001757	9.8	1.67	2.53
13	0.001664	10.34	1.45	3.08
11	0.00158	10.83	1.23	3.80
9	0.0015	11.34	1.01	4.85

Tabla 5.7 Distintos modelos creados para estudiar la influencia del número de hilos radiales y espirales

En la figura 5.25 se representan los valores de energía disipada por deformación plástica para los diferentes modelos, en función de la masa y velocidad del insecto y de la relación de masas de los hilos espirales y radiales.

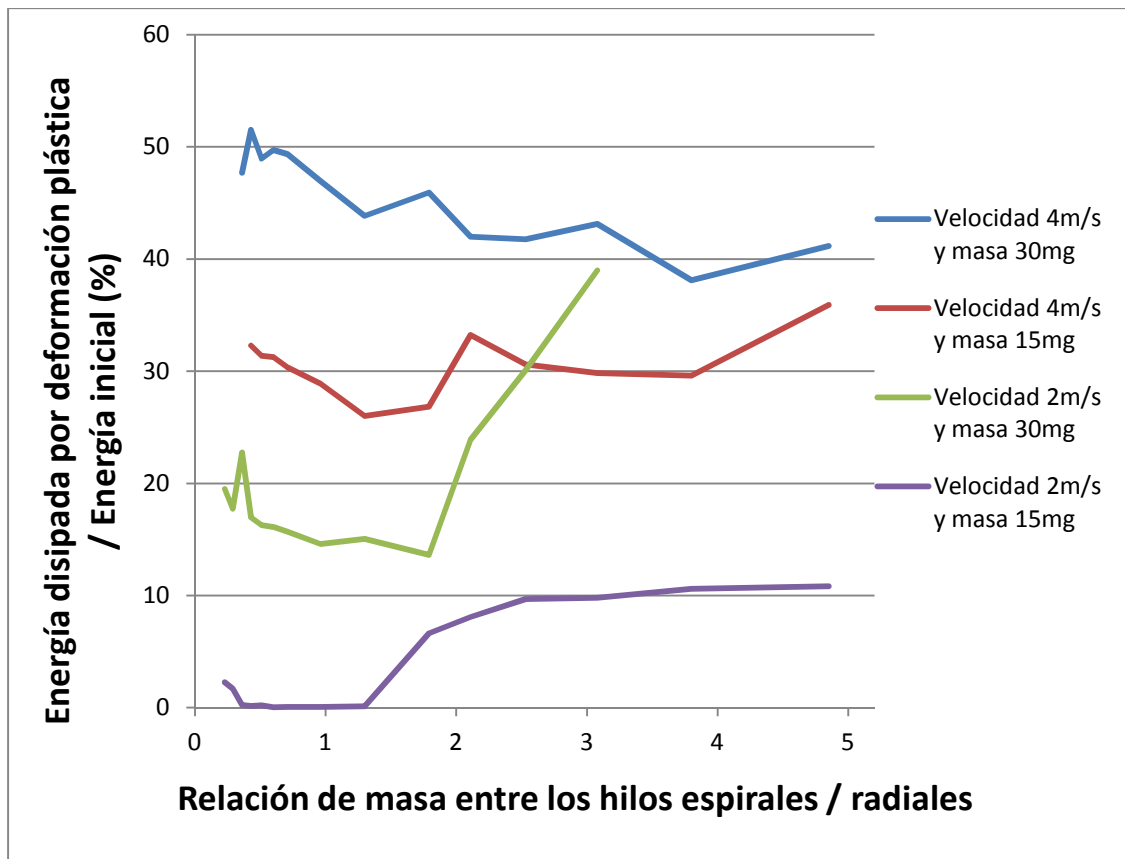


Fig. 5.25 Energía disipada por deformación plástica en función de la relación de masa entre los hilos espirales y radiales para distintas condiciones de impacto

Se han hecho un total de 75 simulaciones, de las cuales alguna de ellas se ha desechado debido a que la tela de araña no consigue atrapar bien a la esfera.

Como se puede ver en las gráficas anteriormente expuestas, la energía disipada por deformación plástica en la tela de araña varía si se alteran las masas de los hilos que la componen. Además, para cada dupla velocidad – masa del insecto, se puede encontrar una relación de masa entre los hilos radiales y espirales que minimice dicha energía.

Si se observan únicamente las curvas correspondientes a los modelos que tienen la misma masa, la relación de masa correspondiente al mínimo de energía disipada aumenta con la velocidad. Esto quiere decir que si el insecto impacta con una velocidad alta, se va a necesitar un menor paso de los hilos espirales en detrimento del número de hilos radiales que si impacta a una velocidad baja.

En la tabla 5.8 se presentan los parámetros geométricos de la configuración óptima de la tela para la obtención de los menores daños posibles para las masas y velocidades de insecto estudiadas.

Velocidad (m/s)	Masa (mg)	m.espiral/m.radial	Nº de hilos radiales	Paso de la espiral (m)
2	15	0.6	33	0.003365
4	15	1.3	23	0.002235
2	30	1.79	19	0.00197
4	30	3.8	11	0.00158

Tabla 5.8 Configuración óptima de la tela de araña para unas condiciones de impacto dadas

Podemos por tanto afirmar que existe una configuración óptima de los hilos radiales y espirales que minimiza los daños permanentes producidos en la tela de araña durante el impacto de un insecto. Hay que tener en cuenta que esto se produce para un insecto con unas características dadas, y que si éstas cambian la configuración ya no será la óptima.

5.7 Influencia del diámetro de los hilos

Resulta de interés conocer el motivo por el cual los diámetros de los hilos son los que son. Para ver cómo afectan a la respuesta de la tela ante un impacto de insecto, en este apartado se van a hacer varias simulaciones variando en la misma proporción el área de la sección transversal de los hilos radiales y espirales. Para que el coste energético necesario para la creación de la tela sea la misma en todos los casos, se ha mantenido constante el volumen de los hilos de las distintas regiones ajustando para cada modelo los siguientes parámetros:

- Número de hilos radiales
- Paso de la espiral

En la tabla 5.9 se encuentran las características de cada uno de los modelos.

Factor de multiplicación del área	Área de los hilos radiales	Área de los hilos espirales	Diámetro de los hilos radiales	Diámetro de los hilos espirales	Número de hilos radiales	Paso de la espiral
0.4	3.85E-12	1.66E-12	2.21E-06	1.45E-06	92	0.00167
0.5	4.81E-12	2.08E-12	2.47E-06	1.62E-06	74	0.0021
0.6	5.77E-12	2.49E-12	2.71E-06	1.78E-06	62	0.00252
0.7	6.73E-12	2.91E-12	2.92E-06	1.92E-06	53	0.00293
0.8	7.70E-12	3.32E-12	3.13E-06	2.05E-06	46	0.00336
0.9	8.66E-12	3.74E-12	3.32E-06	2.18E-06	41	0.00377
1	9.62E-12	4.16E-12	3.50E-06	2.30E-06	37	0.0042
1.1	1.06E-11	4.57E-12	3.67E-06	2.41E-06	34	0.00463
1.2	1.15E-11	4.99E-12	3.83E-06	2.52E-06	31	0.00502

Tabla 5.9 Parámetros que definen la geometría de los modelos estudiados

Para los modelos de tela de araña anteriormente propuestos se han hecho simulaciones con insectos de diferentes masas y velocidades de impacto, y los resultados de la energía disipada por deformación plástica se presentan en la figura 5.26.

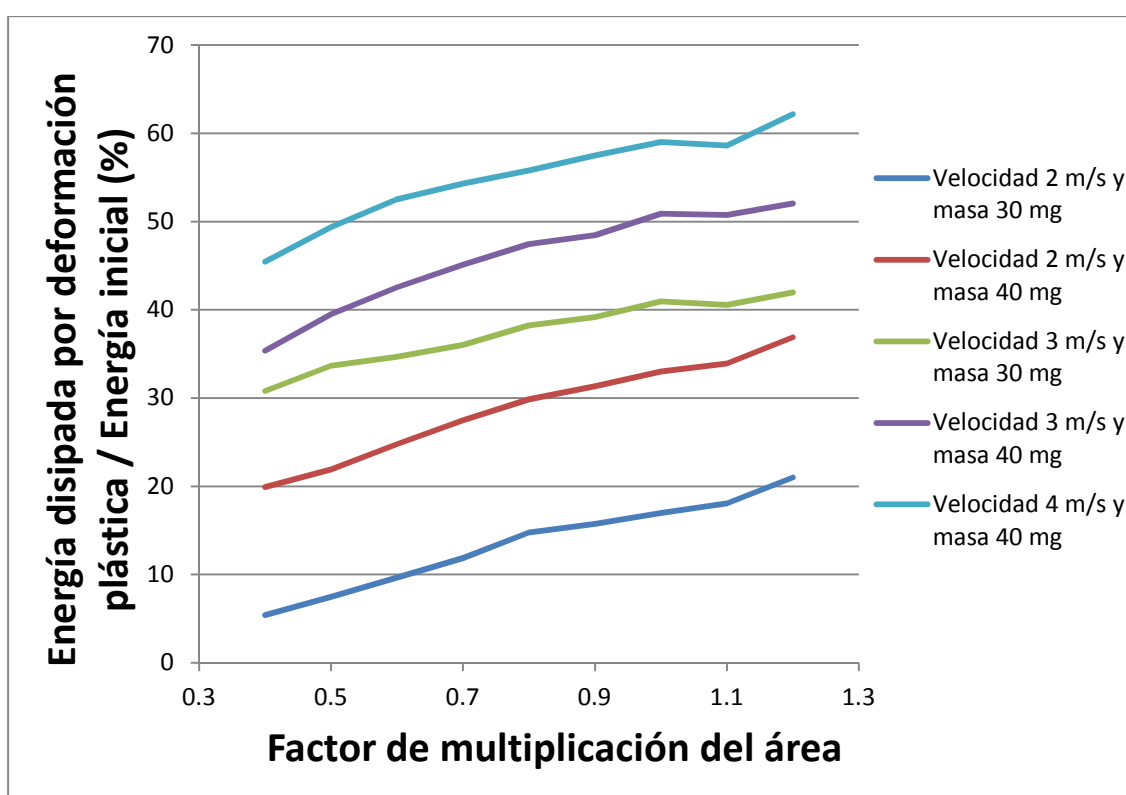


Fig. 5.26 Energía disipada por deformación plástica en función del factor de multiplicación del área para distintas condiciones de impacto

Analizando la figura 5.27, se ve que existe una tendencia clara en los resultados: Cuánto menor sea el factor de multiplicación del área menor será el porcentaje de energía disipada por deformación plástica, independientemente de la masa y de la velocidad de impacto del insecto en el rango considerado. También se puede ver que si la energía cinética inicial aumenta, también lo hace el porcentaje de energía disipada por deformación plástica.

Sería conveniente estudiar el efecto del rozamiento aerodinámico en estos resultados, ya que se está variando la longitud total de hilos radiales y espirales. En la figura 5.27 se presentan los valores de energía disipada por el efecto aerodinámico con respecto a la energía inicial en función del factor de multiplicación del área.

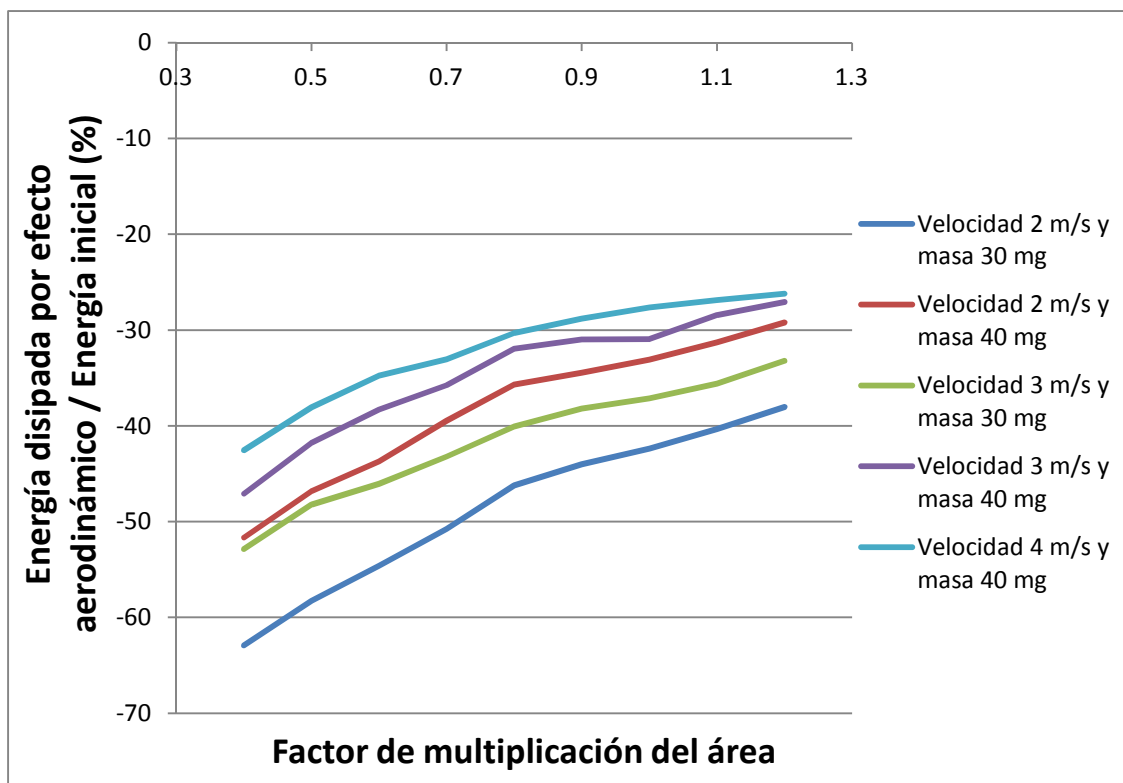


Fig. 5.27 Energía disipada por efecto aerodinámico en función del factor de multiplicación del área para distintas condiciones de impacto

Para cualquier condición de impacto de las que se han considerado, la energía disipada por efecto aerodinámico aumenta al disminuir el factor de multiplicación del área (el signo negativo indica únicamente que el trabajo es realizado por las fuerzas externas). Si se analiza la ecuación que define la fuerza de Drag por unidad de volumen se ve que esta tendencia es lógica ya que aparece en el denominador el diámetro de los hilos, por lo que cuanto menor sea, mayor será dicha fuerza (ver ecuación [7] en el apartado 3.6) Esto solamente se puede afirmar debido a que el volumen de cada tipo de hilo (radial y espiral) es constante en todos los modelos.

Para dos distintas condiciones de impacto, se comparan en la figura 5.28 los resultados obtenidos previamente a los de las mismas simulaciones pero sin tener en cuenta el efecto aerodinámico.

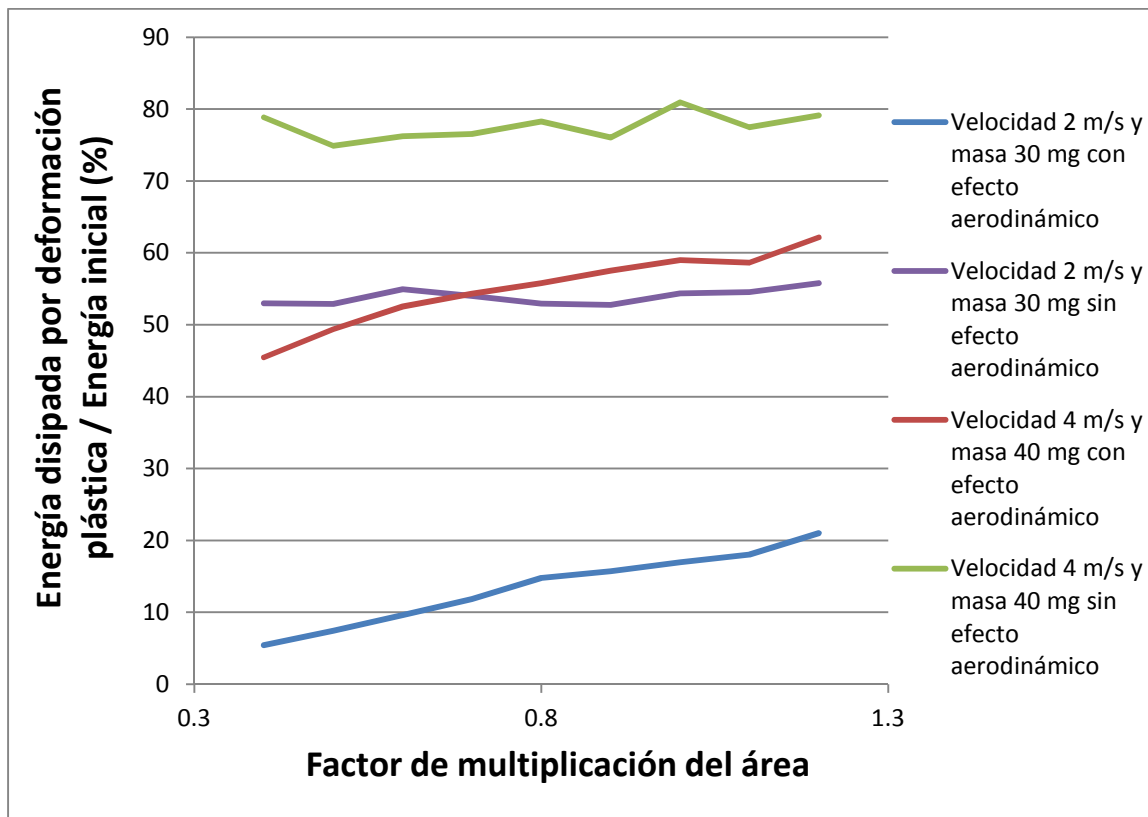


Fig. 5.28 Energía disipada por efecto aerodinámico en función del factor de multiplicación del área para distintas condiciones de impacto con y sin efecto aerodinámico

La energía disipada por deformación plástica es mayor cuando no actúa la fuerza de Drag. Además, se puede ver que el factor de multiplicación del área no influye en dicha energía. Esto quiere decir que los resultados presentados previamente (gráficas 5.26 y 5.27) no se ven condicionados directamente por el cambio de geometría (se añadieron o eliminaron hilos radiales y espirales), sino indirectamente al ser mayor la fuerza de Drag al modificar los diámetros de los hilos manteniendo el volumen de cada región constante.

Por lo tanto parece ser que la tela de araña es más efectiva cuanto menor sean los diámetros de sus hilos, manteniendo el volumen constante. Sería interesante saber si existe alguna barrera fisiológica que impida a una araña producir hilos de pequeño diámetro, y en tal caso estudiar el caso límite.

6 Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

A continuación se exponen las conclusiones derivadas del Proyecto Fin de Carrera:

- El rozamiento aerodinámico es una componente relevante a la hora de disipar la energía cinética de un insecto, y su aportación:
 - Es independiente de la velocidad de impacto.
 - Disminuye al aumentar la masa del insecto.
 - Provoca una menor degradación de la tela.
- El comportamiento viscoelástico de los hilos es beneficioso debido a que bajo su influencia:
 - La tela sufre un menor nivel de degradación.
 - Resulta en un menor tiempo de detención del insecto.
- No se ha podido demostrar que la pretensión tenga un efecto beneficioso para la tela de araña. Sería preciso encontrar una metodología de modelización que permitiera ajustar correctamente los valores de las pretensiones de los hilos.
- Existe diferencia entre las propiedades mecánicas de los hilos radiales y espirales, resultando en una menor degradación de la tela.
- La diferencia entre los diámetros de los hilos conlleva a una degradación menor de los radiales en detrimento de los espirales.
- El marco secundario de la tela de araña tiene una importancia vital desde el punto de vista estructural de la tela ya que permite una distribución homogénea de las tensiones en los hilos radiales.
- Para cada impacto de insecto puede encontrarse una configuración geométrica óptima de los hilos radiales y espirales que minimiza la degradación de la tela.
- Para un mismo volumen de seda, la degradación de la tela es menor cuanto menor sea el diámetro de los hilos a costa de incrementar la longitud total de los hilos radiales y espirales, debido al aumento del rozamiento aerodinámico.

6.2 Trabajos futuros

A lo largo de la realización del proyecto, han surgido nuevas vías de estudio que podrían considerarse para trabajos futuros, citados a continuación:

- Modelización de telas de distinta geometría y comparación de la eficiencia estructural con la tela de araña. Por ejemplo, una tela compuesta por hilos dispuestos de forma ortogonal.
- Realización de simulaciones con varios impactos consecutivos y estudiar la degradación acumulada en la tela.
- Automatización completa de todo el proceso, desde la generación de la malla hasta la obtención de resultados, para la realización de simulaciones de manera todavía más eficiente.

7 Bibliografía

Alam, M.S., Jenkins, C.H., Damage tolerance in naturally compliant structures, *Int. J. Damage Mech.*, 2005, **12**, 365-384

Alam, M.S., Wahab, M.A., Jenkins, C.H., Mechanics in naturally compliant structures, *Mech mater*, 2007, **39**, 145-160.

Anderson, J.F., Metabolic rates of spiders, *Comp. Biochem. Physiol.*, 1970, **33**, 51-72.

Aoyanagi, Y., Okumura, K., Simple model for the mechanics of spider webs, *Phys. Rev. Lett.*, 2010, **104**, 038102

Blackledge, T.A., Summers, A.P., Hayashi, C.Y., Gumfooted lines in black widow cobwebs and the mechanical properties of spider capture silk, *Zoology*, 2005a, **108**, 41-46

Blackledge, T.A., Swindeman, J.E., Hayashi, C.Y., Quasistatic and continuous dynamic characterization of the mechanical properties of silk from the cobweb of the black widow spider *Latrodectus hesperus*, *J. Exp. Biol.*, 2005b, **208**, 37-49.

Blackledge, T.A., Zevenbergen, J.M., Condition-dependent spider web architecture in the western black widow, *Latrodectus hesperus*, *Anim. Behav.*, 2007, **73**, 855-864.

Blackledge, T.A., Kuntner, M., Agnarsson, I., The Form and Function of Spider Orb Webs: Evolution from Silk to Ecosystems, *Adv. Insect. Physiol.*, 2011, **41**, 175-262.

Boutry, C., Blackledge, T.A., Biomechanical variation of silk links spinning plasticity to spider web function, *Zoology*, 2009, **112**, 451-460.

Cunniff, P.M., Fossey, S.A., Auerbach, M.A., Song, J.W., Kaplan, D.L., Adams, W.W., Eby, R.K., Mahoney, D., Vezie, D.L., Mechanical and Thermal Properties of Dragline Silk from the Spider *Nephila clavipes*, *Silk Polymers*, 1994, **21**, 234-251

Denny, M., The physical properties of spider's silk and their role in the design of orb-webs, *J. Exp. Biol.*, 1976, **65**, 483-506.

Elices, M., Plaza, G.R., Pérez-Rigueiro, J., Guinea, G.V., The hidden link between supercontraction and mechanical behavior of spider silks, *J. Mech. Behav. Of Biom. Mat.*, 2011, **4**, 658-669

Gosline, J.M., DeMon, M.W., The structure and properties of spider silk, *Endeavour*, 1986, **10**, 37-43

- Gosline, J.M., Guerette, P.A., Ortlepp, C.S., Savage, K.N., The mechanical design of spider silks: From fibroin sequence to mechanical function, *J. Exp. Biol.*, 1999, **202**, 3295-3303
- Guerette, P.A., Ginzinger, D.G., Weber, B.H.F., Gosline, J.M., Silk properties determined by gland-specific expression of a spider fibroin gene family, 1996, *Science*, **272**, 112-115
- Ko, F.K., Jovicic, J., Modeling of mechanical Properties and Structural Design of Spider Web, *Bio. Macromolecules*, 2004, **5**, 780-785
- Lin, L.H., Edmonds, D.T., Vollrath F., Structural engineering of an orb- spider's web, *Nature (London)*, 1995, **373**, 146-148.
- Lin, L.H., Sobek, I.W., Structural Hierarchy in Spider Webs and Spider Web Type Systems, *The Structural Engineer*, 1998, **76(4)**, 59-64.
- Lubin, Y.D., Web structure and function: the non-adhesive orb web of *Cyrtophora moluccensis*, *Form. Funct.*, 1973, **6**, 337-358.
- Masters, W.M., Vibrations in the orbwebs of *Nuctenea sclopetaria* (Araneidae): 1. Transmission through the web, *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 1984, **15**, 207-216
- Moore, A.M.F., Tran, K., Material properties of cobweb silk from the black widow spider *Ladroectus Hesperus*, *Bio. Macromolecules*, 1999, **24**, 277-282
- Osakim, S., Spider silk as mechanical lifeline, *Nature*, 1996, **384**, 419
- Peakall, D.B., Witt, P.N., The energy budget of an orb web-building spider, *Comp. Biochem. Physiol.*, 1976, **54**, 187-190.
- Pérez-Rigueiro, J., Elices, M., Guinea, G.V., Controlled supercontraction tailors the tensile behaviour of spider silk, *Polymer*, 2003, **44**, 3733-3736
- Planas, J., Guinea, G.V., Elices, M., Constitutive model for fibre-reinforced materials with deformable matrices, *Physical Review*, 2007, **76**, 041903
- Prestwich, K.N., The energetics of web-building in spiders, *Comp. Biochem. Physiol.*, 1977, **57A**, 321-326.
- Prokop, P., 2006. Prey Type does not Determine Web Design in Two Orb-Weaving Spider, *Zoological Stu.*, 2006, **45**, 124-131.
- Sahni, V., Blackledge, T.A., Dhinojwala, A., Viscoelastic solids explain spider web stickiness, *Nat. Commun*, 2010, **1**, 19.

Sensenig, A.T., Lorentz, K.A., Kelly, S.P., Blackledge, T.A., Spider orb webs rely on radial threads to absorb prey kinetic energy, *J. Exp. Biol.*, 2011, **114**, 233-238.

Swanson, B.O., Anderson, S.P., DiGiovine, C., Ross, R.N. Dorsey, J.P., The evolution of complex biomaterial performance: The case of spider silk, *Int. Comp. Bio.*, 2009, **49(1)**, 21-31.

Tritton, D.J., *Physical fluid dynamics*, 1988, **2**.

Vollrath, F., Analysis and interpretation of orb spider exploration and web-building behaviour, *Adv. Stud. Behav.*, 1992, **21**, 147-199

Vollrath, F., Edmonds, D.T., Modulation of the mechanical properties of spider silk by coating with water, *Nature* 1989, **340**, 305-307.

Vollrath, F., Downes, M. Krackow, S., Design variability in Web Geometry of an Orb-Weaving Spider, *Physiol. Behav.*, 1997, **62**, 735-743.

Wirth, E., Barth, F.G., Forces in the spider orb web, *J. Comp. Physiol. A.*, 1992, **171**, 359-371.

Zemlin, J.C., A study of the mechanical behaviour of spider silk, *Natick. Mass. Clothing and Materials Lab., U.S. Army National Lab. Technical Report 69-29-CM*, Contract DAAG-67-C-0135, 1968.

Zschokke, S., Nomenclature of the orb-web, *J. Arachnol.*, 1999, **27**, 542-546.